

**Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales
2017/2018**

Trabajo Fin de Grado

**DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE UN
MÓDULO HABITABLE EN MARTE**

Juan Guijarro Tortosa

**Tutor: Carlos Santiuste Romero
Madrid, Junio 2018**

RESUMEN

En este Trabajo Fin de Grado se estudia el diseño de la estructura de un módulo habitable en el planeta Marte. El estudio se centra en un tipo de estructura realizada mediante fabricación aditiva con materiales in-situ, en este caso impresión 3D de basalto. La estructura en cuestión tendrá el objetivo de servir como base para misiones de exploración espacial de larga duración.

Se analizará el tipo de configuración del módulo más apropiada para los objetivos y especificaciones de una posible misión tripulada a Marte desde un punto de vista estructural. La forma de estructura que se investigará será el domo geodésico, con una configuración determinada, y que se ampliará con la adhesión de partes que funcionaran como pasajes entre los distintos módulos que se pudieran fabricar.

Se calculará la disposición geométrica de cada parte del módulo y las secciones adecuadas para soportar cargas y presiones. Para evaluar el comportamiento del sistema se utilizará el método de análisis por elemento finitos, con la herramienta de software Abaqus.

Los resultados obtenidos muestran una configuración del domo en la que se han añadido dos estructuras adicionales y se han dimensionado las secciones de tal manera que la estructura soporta cargas de peso, dilatación térmica y presurización interna dentro de los límites del material propuesto y con un coeficiente de seguridad suficiente.

Palabras clave: Fabricación Aditiva, Impresión 3D de basalto, Exploración de Marte, Análisis Elementos Finitos, Domo Geodésico

ABSTRACT

In this Final Degree Project, the design of the structure of a habitable module in the planet Mars is studied. The type of structure this work is focused is made via additive manufacturing with in-situ materials, in this case a basalt 3D printed one. The purpose of this kind of construction will be to serve as a base for long-term space exploration.

The suitable configuration of the module will be analyzed to fulfill the specifications of a prospective manned mission to Mars from a structural point of view. The structure form investigated here is what is known as Geodesic Dome, with a specific configuration, which will be extended with the adhesion of supplementary parts that will be used as passages through the different modules that may be constructed.

The geometric layout of every part of the module will be calculated and the correct sections of the elements to support the loads and pressures. To evaluate the system behavior the Finite Element Method will be used, with the software tool Abaqus.

The results obtained here show a dome configuration in which two further structures have been added and the sections of every element have been dimensioned to support the weight loads, thermal dilatations and inner pressurization within the physical limits of the proposed material and with a satisfactory security coefficient.

Key words: Additive manufacturing, Basalt 3D Printing, Mars Exploration, Finite Element Method, Geodesic Dome

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer profundamente a todas las personas que me han apoyado a lo largo de mis estudios y en la realización de este proyecto.

En primer lugar, a mi familia, en especial a mis padres Juan y M^aDolores, sin cuyo incondicional apoyo no me habría sido posible llegar hasta aquí.

Y en segundo lugar a todo el profesorado entre ellos mi tutor Carlos Santiuste, por guiarme y orientarme a lo largo de la carrera y en la elaboración de este trabajo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	18
1.1 Motivación	18
1.2 Objetivos	21
1.3 Estructura del trabajo	22
ESTADO DEL ARTE	24
2.1 Introducción	24
2.2 Análisis de la viabilidad	24
2.2.1 Social	25
2.2.2 Económico	25
2.3 Misión propuesta	26
2.3.1 Condiciones en Marte	27
2.3.2 Necesidades de los astronautas	28
2.3.3 Impresión 3D in-situ (ISRU)	28
2.3.4 Presurización	29
2.3.5 Fases	30
2.3.5.1 Primera fase	30
2.3.5.2 Segunda fase	31
2.3.6 Aproximación final	32
2.4 Tensegridad	32
2.4.1 Tensegridad esférica	33
2.4.2 Grandes círculos	34
2.4.3 Subdivisión Geodésica	35
2.4.4 Factores de cuerda	38
2.4.5 Elección del poliedro	38
2.5 Comportamiento dinámico del domo	40
2.6 Método de los elementos finitos	41
DISEÑO DEL DOMO	43
3.1 Introducción	43
3.2 Primera fase: Diseño inicial	44
3.2.1 Métodos de proyección	44

3.2.2 Asignación de puntos	46
3.2.3 Simetría	47
3.2.4 Longitud de barras y puntos	50
3.3 Segunda fase: Diseño final	53
3.3.1 Truncado	53
3.3.2 Diseño de pasillos	54
3.3.3 Asignación de puntos y barras	55
3.4 Recuento de barras y volumen de material	57
MÉTODO DE CÁLCULO	62
4.1 Introducción	62
4.2 Cálculo de cargas	63
4.2.1 Peso propio	63
4.2.2 Fase inicial	63
4.2.2.1 Presurización	63
4.2.2.2 Peso de placas	67
4.2.3 Fase final	69
4.2.3.1 Presurización y Peso de placas	69
4.3 Vectores de Carga y Restricciones	73
4.3.1 Condición de contorno	73
4.3.2 Fase inicial	73
4.3.2.1 Pesos	73
4.3.2.2 Presurización	75
4.3.3 Fase final	80
4.3.3.1 Pesos y Presurización	80
RESULTADOS	83
5.1 Fase inicial	83
5.1.1 Secciones	83
5.2 Fase final	86
5.2.1 Secciones	87
5.3 Pandeo	90
MEJORAS Y TRABAJOS FUTUROS	93

6.1 Introducción	93
6.2 Estudio de secciones individualmente	93
6.3 Estructuras tipo Lattice	93
6.4 Diseño de estructuras geodésicas según su función	94
CONCLUSIONES	96
7.1 Conclusiones	96
7.2 Discusiones	97
BIBLIOGRAFÍA	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Áreas de desarrollo en la tecnología para una misión tripulada a Marte [17]	25
Tabla 2. Dosis máximas de radiación recomendadas para un astronauta durante 10 años de servicio en Sieverts [29]	28
Tabla 3. Caracterización de la tasa de flujo de impresión (m^3/s) y el tiempo de fabricación (s) de un domo [20]	31
Tabla 4. Masa de los componentes (en kg) para la misión propuesta [20]	32
Tabla 5. Comparación de poliedros	36
Tabla 6. Posición de los puntos principales	50
Tabla 7. Longitud (m) de las barras principales	51
Tabla 8. Coordenadas cartesianas de los vértices del domo	51
Tabla 9. Longitudes (m) de las barras del pasillo 1	56
Tabla 10. Longitudes (m) de las barras del pasillo 2	56
Tabla 11. Recuento de barras y volumen (m^3) de basalto a extraer	57
Tabla 12. Recuento y volumen (m^3) de material para las placas	59
Tabla 13. Área (m^2) de los triángulos principales y fuerza de presurización (N)	64
Tabla 14. Fuerza (N) de presurización por cada triángulo que rodea al vértice	64
Tabla 15. Fuerza puntual (N) en los vértices principales	67
Tabla 16. Peso (N) de las placas	68
Tabla 17. Peso (N) correspondiente a cada vértice principal	68
Tabla 18. Área (m^2) y Volumen (m^3) de los triángulos del pasillo 1	69
Tabla 19. Fuerzas (N) de presurización y peso del pasillo 1	70
Tabla 20. Sumatorio de las fuerzas (N) que actúan en cada vértice, Pasillo 1	71
Tabla 21. Área (m^2) y Volumen (m^3) de los triángulos del pasillo 2	71
Tabla 22. Fuerzas de presurización (N) y peso (N) del pasillo 2	72
Tabla 23. Sumatorio de las fuerzas (N) que actúan en cada vértice, Pasillo 2	72
Tabla 24. Vectores unitarios de los vértices del domo	76
Tabla 25. Vectores de carga de cada vértice del domo	78
Tabla 26. Vectores unitario y normal de los puntos del Pasillo 1	80

Tabla 27. Vectores unitario y normal de los puntos del Pasillo 2 _____	81
Tabla 28. Vectores de carga de los vértices del Pasillo 1 y 2 _____	82
Tabla 29. Estudio de secciones similares para el domo _____	84
Tabla 30. Carga crítica de Euler (N) para las barras sometidas a compresión _____	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Recreación del módulo Insight en la superficie marciana [4].....	19
Figura 2. Técnicas de fabricación aditiva: FDM, SLA, SLS y Polijet [7].....	20
Figura 3. Representación de la técnica de modelado por deposición fundida [36]	29
Figura 4. Imagen de la secuencia de inflado de una estructura interna [39]	29
Figura 5. Esquema de una Impresora 3D dentro del Ag-domo [20]	30
Figura 6. Esquema de la disposición de módulos de la base [20]	31
Figura 7. Estructura tensegrítica de tres barras [40]	33
Figura 8. Rotación de polígonos [38]	33
Figura 9. Tensegridad esférica de 6 barras [40]	34
Figura 10. Generación de grandes círculos [40]	34
Figura 11. Familias de grandes círculos [38]	35
Figura 12. Proyección de vértices en la esfera [40]	36
Figura 13. Subdivisión del icosaedro [40]	36
Figura 14. Clase I y Clase II [40]	37
Figura 15. Factor de cuerda [40]	38
Figura 16. Domo geodésico a partir del icosaedro 4V, Clase I [41]	40
Figura 17. Secuencia de mallado con distinto tamaño de celdas	41
Figura 18. Método I [40]	45
Figura 19. Método II [40]	45
Figura 20. Guía para nombrar los vértices	46
Figura 21. Familias de grandes círculos [38]	47
Figura 22. Generación del triángulo #2	48
Figura 23. Generación del triángulo #4 repitiendo parte del #1	48
Figura 24. Triángulos #1 #2 y #4	49
Figura 25. Triángulos #3 #5 y #6	49
Figura 26. Triángulos #7 #8 y #9	49
Figura 27. Truncado del domo	54
Figura 28. Diseño del pasillo1	54
Figura 29. Diseño del pasillo 2	55

Figura 30. Guía para nombrar cada barra	55
Figura 31. Configuración básica de los módulos	61
Figura 32. Diseño del Domo Geodésico en AutoCAD	62
Figura 33. Tipos de triángulos	64
Figura 34. Mapa de la distribución del tipo de triángulos [41]	65
Figura 35. Generación de los triángulos adyacentes al principal	65
Figura 36. Familia de polígonos formados alrededor de los vértices principales	66
Figura 37. Colocación de las placas	67
Figura 38. Dirección de la gravedad aplicada	73
Figura 39. Fuerza P1	74
Figura 40. Fuerza P2.....	74
Figura 41. Fuerza P3.....	75
Figura 42. Fuerza P4.....	75
Figura 43. Fuerza de presurización (N)	76
Figura 44. Combinación de todas las cargas aplicadas	79
Figura 45.Resultado de la tensión de V. Mises (Pa) con sección única	84
Figura 46. Sección 1 Domo	85
Figura 47.Sección 2 Domo	85
Figura 48.Sección 3 Domo	86
Figura 49. Resultados de la tensión de V. Mises (Pa) para secciones varias	86
Figura 50. Resultado de la tensión de V. Mises (Pa) para estructura completa, seccion única	87
Figura 51. Sección 1 estructura completa.....	88
Figura 52.Sección 2 estructura completa.....	88
Figura 53.Sección 3 estructura completa.....	88
Figura 54. Sección 4 estructura completa.....	89
Figura 55.Sección 5 estructura completa.....	89
Figura 56. Resultados de la tensión de Von Mises (Pa) para estructura completa, secciones finales	89
Figura 57. Resultados de las tensiones (Pa) en las direcciones principales, estructura final	90
Figura 58. Imagen de un análisis de estructuras tipo lattice por el método de elementos finitos [7]	94

INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Como una vez escribió Carl E. Sagan *“Nuestro planeta es una solitaria mancha en la gran y envolvente penumbra cósmica. En nuestra oscuridad, en toda esta vastedad, no hay ni un indicio de que vaya a llegar ayuda desde algún otro lugar para salvarnos de nosotros mismos. La Tierra es el único mundo conocido hasta ahora que alberga vida. No hay ningún otro lugar, al menos en el futuro próximo, al cual nuestra especie pudiera migrar. Visitar, sí. Colonizar, aún no...”* [1].

Hoy más que nunca disponemos de un sinfín de recursos a nuestro alcance, el desarrollo de la tecnología nos permite proponer nuevos objetivos hasta ahora impensables.

La exploración espacial ha sido un objetivo recurrente en las últimas décadas. El espacio ha fascinado a muchas generaciones a lo largo de la historia. Y es en los últimos años cuando el avance de la tecnología nos ha permitido conocer y obtener una cantidad enorme de información sobre el universo.

Desde el programa *Apollo* [2] que permitió al hombre posarse en la Luna, se hizo patente la capacidad de la humanidad en conseguir retos inimaginables. En la actualidad programas como *Mars Science Laboratory (Curiosity)* [3] han arrojado luz sobre la exploración del planeta Marte.

Marte es un escenario ideal para entender la historia del sistema solar y como los planetas pequeños se transforma con el paso del tiempo. Planetas rocosos como Venus, la Tierra o Marte se formaron hace 4.5 mil millones de años, pero su transformación a lo largo del tiempo hasta la actualidad los ha hecho muy diferentes.

Se sabe que Marte, aunque existe agua en estado sólido, tuvo una vez ríos y lagos con un clima cálido, pero la continua pérdida de la atmósfera junto con un proceso de deshidratación ha dejado un planeta que a priori no puede sostener vida. No obstante, hay mucho interés por lo que este planeta puede mostrarnos sobre el origen de la evolución de la vida y por qué no, un futuro destino para la supervivencia de la especie humana.

La exploración de Marte tiene varias razones científicas y prácticas para su realización. Su geología es compleja y muy similar a la de la Tierra y su clima a lo largo de los millones de años también ha cambiado mucho.

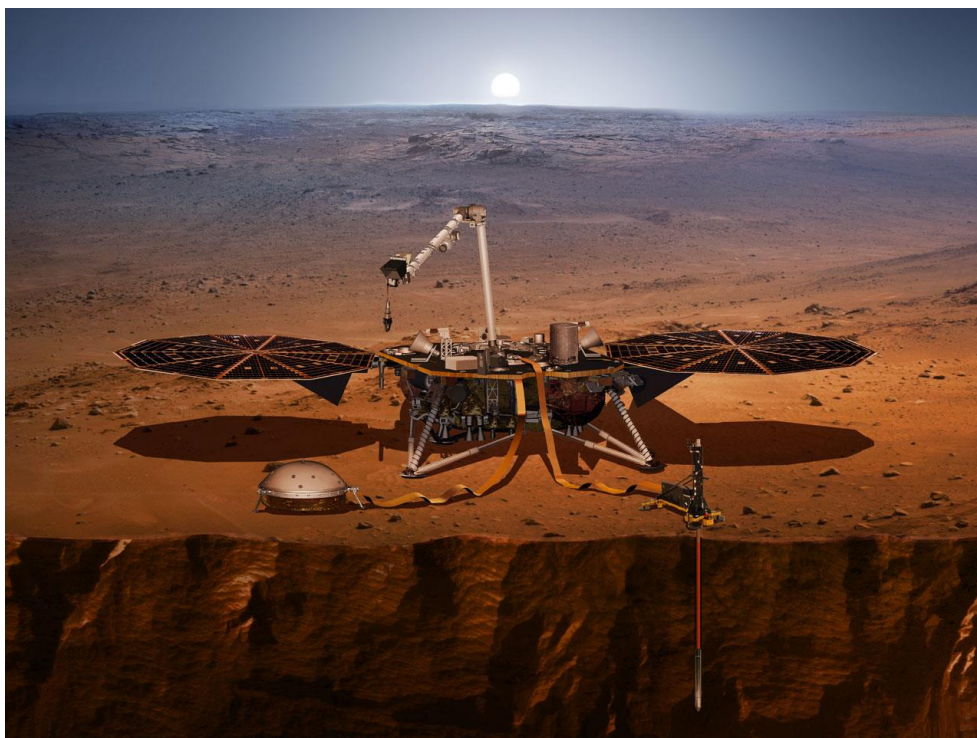


Figura 1. Recreación del módulo InSight en la superficie marciana [4]

Algunos de los objetivos principales [5] que llevan a impulsar programas de exploración son:

- Determinar si en Marte alguna vez ha existido la vida, descubriendo evidencias de vida pasada en ambientes potenciales para sustentar vida.
- Conocer y entender los procesos climáticos en Marte caracterizando el clima presente, pasado reciente y más antiguo.
- Entender el sistema geológico, su origen y su evolución, estudiando la estructura, composición, y movimientos internos del planeta.
- Y por último, allanar el camino para una posible misión humana al planeta.

Para este último objetivo se ha de recabar el suficiente conocimiento para diseñar e implementar una misión tripulada a la superficie de Marte o cualquiera de sus lunas (Phobos y Deimos). Todo ello con un coste y riesgo aceptables.

Una misión tripulada a Marte tendría unas ventajas enormes en cuanto a desarrollo de la industria y la tecnología, por el reto que supone y los beneficios que se obtendrían de los posibles descubrimientos futuros. Desde los años sesenta, hay una larga lista de misiones que han enviado orbitadores, aterrizadores y rovers a Marte. Pero es en estos últimos años en los que se ha estudiado más a fondo la posibilidad de enviar humanos al planeta.

Misiones de este tipo supondrían un reto mayúsculo y necesitarían el desarrollo avanzado de diversas tecnologías. Colonizar el planeta significaría que los astronautas deben estar preparados y tener todo lo necesario para largas estancias, por lo que habría que enviar todo lo necesario para la supervivencia y correcto desarrollo de las misiones.

Llevar materiales de construcción además de otros ítems supone un problema en cuanto al gasto de combustible y transporte debido al peso en las naves. Sin embargo, existe la posibilidad de desarrollar tecnologías para poder utilizar los materiales y recursos en el destino para solventar esta dificultad.

Una de esas tecnologías es la fabricación aditiva, se han hecho importantes avances en este sector, y aunque tiene aún mucho que desarrollar, es una tecnología que ha revolucionado la industria y que tiene un prometedor futuro. Este proceso permite la fabricación de piezas complejas, además de una mayor simplicidad en la fabricación e incluso menor uso de material.

La técnica de impresión 3D data de 1971 [6]. Dentro de las tecnologías de fabricación actuales la denominada impresión 3D es el símbolo perfecto de la industria 4.0, aunando entre sus ventajas competitivas la eficiencia y la adaptabilidad en el diseño y la fabricación [7]. El proceso requiere la creación de un patrón de impresión y siguiendo ese patrón se va conformando la pieza diseñada capa por capa mediante diferentes técnicas.

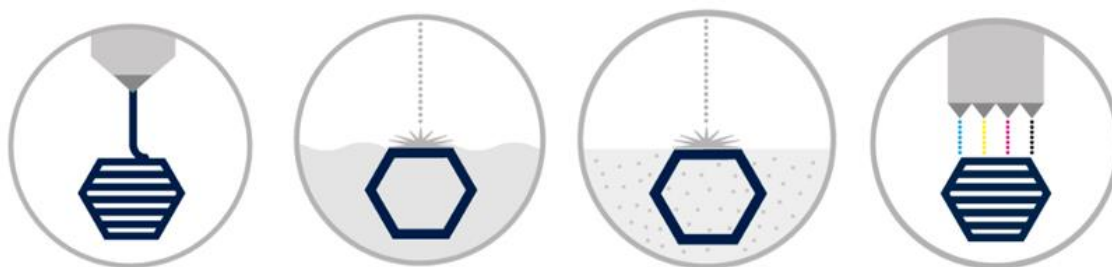


Figura 2. Técnicas de fabricación aditiva: FDM, SLA, SLS y Polijet [7]

Se pueden utilizar varias metodologías: Fused Deposition Modeling (FDM) o Modelado por Deposición Fundida, en el que el material se va depositando en estado fundido; Stereolithography (SLA) o Estereolitografía, en la que se solidifica una resina mediante la aplicación de luz; Selective Laser Sintering (SLS), que sinteriza un lecho de polvo seleccionando las zonas mediante láser; Polijet, donde se depositan fotopolímeros que son luego endurecidos por luz ultravioleta.

La gran ventaja de utilizar este tipo de fabricación es poder utilizar los materiales in-situ, con lo que no solo se ahorraría en el coste que conlleva el transporte de los materiales, sino que brinda la posibilidad de fabricar todas las piezas y estructuras que se requieran.

Otras ventajas son el alto grado de personalización de las piezas del volumen de producción, pudiendo fabricar la cantidad que se desee tan individualizada como se requiera.

No solo no se encarece la producción con la complejidad de la pieza si no que, al no necesitar de anclajes ni uniones, el proceso es mucho más sencillo. Además, es posible

fabricar distintas geometrías y materiales en un mismo objeto, con lo que simplifica o elimina también los posibles ajustes o montajes posteriores.

Es por todo esto, que la posibilidad de aplicar este tipo de tecnología en una posible misión como la exploración de Marte, resulta muy interesante.

1.2 Objetivos

Es necesario el desarrollo de varias áreas de la ciencia para llevar un proyecto como el de una misión a Marte. Este trabajo se centrará en la parte de análisis estructural de un módulo que se fabricaría en el propio planeta con rocas de basalto, por medio de impresión 3D.

El objetivo principal es el de concretar un sistema funcional y viable para la fabricación y establecimiento de una base para estancias prolongadas en Marte.

Este objetivo se subdivide en varios apartados como el propio diseño del módulo, el método con el que se calcula las cargas, las distintas configuraciones y modificaciones del diseño, la obtención de resultados mediante análisis por elementos finitos y posibles mejoras en el futuro.

En el diseño se buscará la forma de la estructura adecuada y que reúna potencialmente las cualidades que exigen un ambiente extraterrestre. El diseño debe empezar por decidir la forma a grandes rasgos que pudiera cumplir satisfactoriamente con las exigencias de un habitáculo.

Una vez decidida la forma también se discutirá el tamaño que tendría para dar cabida a los futuros ocupantes y los equipos necesarios para estancias prolongadas.

Después se decidirá y argumentará de qué forma se han de conformar los elementos que sustentarán la estructura y soportarán las cargas esperadas. Se hará de forma esquemática y posteriormente se completará el diseño con la información que nos den las cargas a aplicar.

Se expondrá el método más conveniente para evaluar los esfuerzos a los que se someterá el módulo, tanto exteriores como interiores. Paso a paso se irán calculando la dirección y la magnitud de cada una de las fuerzas que actuarán y que serán claves en secciones posteriores donde modificará y rediseñará los componentes.

Se estudiarán varias ordenaciones y configuraciones de los elementos diseñados para determinar cuál es la más propicia para la misión. Distintas disposiciones darán lugar a diferentes prestaciones en cuanto a rigidez, dificultad de fabricación o uso de material.

También se estudiará el dimensionado de las piezas que formarán parte de la estructura según exijan las cargas aplicadas. Para ello se realizará el diseño en dos fases, una inicial en la que se estudiará la estructura con una configuración sencilla y posteriormente se añadirán estructuras suplementarias, con lo que las cargas cambiarán y también lo harán las dimensiones. Estas se diseñarán para que el módulo resista en ambas condiciones.

Para tener una estructura segura se equilibrarán las distintas secciones de los elementos a fabricar. Se valorarán los resultados obtenidos con el método de elementos finitos y se irá evaluando cada diseño según la distribución de las tensiones a lo largo de la estructura.

Con toda la información obtenida se podrá determinar si la configuración es apta y las posibles mejoras en el diseño que se podrían tomar.

1.3 Estructura del trabajo

Cada uno de los objetivos mencionados se irán desarrollando en los distintos capítulos de este trabajo en el orden siguiente:

- En el capítulo segundo se describe todo lo referente a los antecedentes de exploración espacial, conquista de marte, la viabilidad de una posible misión a Marte, la misión de la que se parte para el diseño propuesto, los fundamentos matemáticos y geométricos en los que se basa la estructura elegida y el método de los elementos finitos que se usa para analizar el comportamiento del diseño. Se exponen todos los conceptos y el contexto necesarios para poder entender el trabajo que se ha realizado y los resultados obtenidos.
- En el tercer capítulo se abarca el diseño adecuado que debería tener el módulo. Para diseñar la estructura adecuada hay que tener en cuenta las características del terreno, las condiciones ambientales y el método de fabricación. Se estudian geometrías geodésicas que suponen una buena opción por su gran resistencia en relación a la cantidad de material usado y por ajustarse muy bien a las funciones que podrían desempeñar un habitáculo en unas condiciones como las de Marte. La estructura que se propone es el denominado Domo Geodésico, se presenta primero un modelo sencillo al que se le añaden más partes funcionales. Al final se hará un recuento del material que se necesita para cada parte del sistema.
- En el cuarto capítulo se describe el método por el cual se ha llegado a calcular primero la disposición espacial de cada uno de los elementos que componen la estructura. Después se calculan cada una de las fuerzas que esta estructura soportaría como la presión interna, el peso de la propia estructura y el de las placas superpuestas. Además de eso, se deducen cada una de las direcciones en las que cada fuerza es aplicada alrededor del módulo.
- En el quinto capítulo y haciendo uso del software por elementos finitos se analiza dónde y de qué forma se deben distribuir las secciones de cada barra para que las tensiones generadas se distribuyan uniformemente.

Aquí es donde se tiene que tiene en cuenta cada fase de la construcción y se muestran las distintas distribuciones de las secciones en la cúpula primera y en la estructura completa final con los pasillos incluidos.

- En el sexto capítulo, una vez ya se tienen los resultados, se proponen mejoras y trabajos futuros en los que se debería hacer hincapié para poder obtener nuevas y mejores soluciones.
- Por último, en el capítulo séptimo, se discuten los resultados y se comentan las conclusiones que se derivan de los resultados obtenidos.

ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

Marte ha intrigado a la humanidad por muchos años, desde las primeras observaciones por los astrónomos egipcios [8] pasando por la mitología griega o el dios de la guerra de la cultura romana, hasta las últimas observaciones y descubrimiento de evidencias de grandes reservas de agua bajo la superficie marciana [9].

En las últimas décadas la exploración de Marte ha sido uno de los principales objetivos de las agencias espaciales de todo el mundo. Se ha monitorizado las condiciones atmosféricas en el planeta, su composición e incluso el ambiente de radiación [10]. Sin embargo, se han planteado nuevas direcciones en la exploración marciana: la preparación para una misión tripulada.

Ya en 1996, R. Zubrin [11] propuso un plan (*Mars Direct*) donde una misión no tripulada aterrizaría en Marte y fabricaría combustible para cohetes con los materiales marcianos, seguido de una misión tripulada. Otro plan propuesto es el “*Mars One Project*” [12], que utilizando la tecnología actual plantea la utilización de robots como precursores para una futura misión tripulada.

Sin embargo, aunque son muchos los potenciales proyectos para la exploración que implican llevar a personas a bordo, hay numerosos retos en cuanto a logística, la entrada, descenso y aterrizaje en el planeta de grandes masas necesarias para una misión de esas características.

2.2 Análisis de la viabilidad

No solo es el problema tecnológico que supone lo que se ha de tener en cuenta, sino ventajas y desventajas económicas y sociales de una misión de este calibre. En [13] se analizan estos aspectos y los costes que supondrían a una administración como la NASA.

Marte se presenta como un destino factible debido a su proximidad relativa a la Tierra y las analogías en la superficie. Con los hallazgos de agua encontrados en la superficie junto con las investigaciones hechas de vida en medios extremos, donde se han encontrado microbios creciendo en condiciones límite [14], no es descabellado sugerir en que la vida en Marte fue y es posible.

“Cabe preguntarse el porqué de una misión tripulada, si las máquinas son más rápidas y más baratas.[...] Las misiones no tripuladas están técnicamente limitadas y son incapaces de responder de forma intuitiva ante situaciones complejas” [13].

Por otra parte, un humano con el debido entrenamiento puede operar cientos de piezas de equipamiento, con una movilidad superior, capacidad de planear y de análisis y la

habilidad de adaptarse al contexto. Un humano incrementaría enormemente el volumen de datos científicos que se podrían recoger [13]. Aunque esto implique problemas mucho mayores y más complejos.

2.2.1 Social

Un aspecto importante sería el de inspirar a las generaciones venideras, para motivar a los estudiantes a que se adentren en carreras de ciencia y justificar sus esfuerzos. La idea de que la exploración espacial influencia significativamente a la juventud tiene precedentes, como en el programa *Apollo* por los años sesenta, que resultó en un incremento del número de estudiantes en campos como Ingeniería, Matemáticas o Física.

2.2.2 Económico

Por supuesto la parte más importante en cuanto al planteamiento de la viabilidad de este tipo de proyectos es el coste económico. Una de las principales razones en contra de la idea de lanzar astronautas a Marte es la gran inversión de dinero necesaria. El rango de una misión tripulada, en términos generales, iría de unos \$20 mil millones en [11] a unos \$450 mil millones en [15].

En el artículo [13] se examinan los costes asumiendo un orden de magnitud de precio entre \$30 y \$300 mil millones. El presupuesto más bajo representa dos veces el presupuesto anual de la NASA de unos \$15 mil millones [16]. Si se repartiese dicho coste a lo largo de 30 años, este sería de unos \$8.2 mil millones, que comparando con otros gastos como el del departamento de salud de EEUU, representaría un 0.5% del presupuesto anual, lo que hace que el coste de esta misión relativamente bajo [13].

Tabla 1. Áreas de desarrollo en la tecnología para una misión tripulada a Marte [17]

Challenge to a human Mars mission	Technology development	Terrestrial applications
Harmful effects of microgravity and radiation on human health.	Pharmacological and mechanical prevention treatments.	Prevention, detection, and treatment of illnesses ranging from osteoporosis to cancer.
Limited air, water, and food resources.	Closed loop life-support systems.	Conservation, recycling, waste management.
Limited energy supply.	Alternative energy sources low energy-use technologies.	Renewable efficient energy sources; energy-conserving consumer products.
Human safety and health is threatened in space.	Automation and robotics.	Remote or automated robotics to reduce human risk in hazardous environments.
Hardware impaired by extreme conditions of space.	Extended life, low maintenance materials, hardware, and systems.	Stronger, smaller, more reliable products for consumers.

Algunos de los beneficios que se pueden conseguir, es el desarrollo de diversas tecnologías, potenciando la industria y la economía. Varios ejemplos se ilustran en la *Tabla 1* y otros como la tecnología de satélites.

No cabe duda de que la NASA necesitaría de colaboración y ayuda de agencias espaciales de otros países, tales como China, Rusia o de la European Space Agency.

Las naves para orbitar y aterrizar fueron desarrolladas para las misiones que sea llevaron a cabo en la Luna, pero la creación de un sistema de propulsión interplanetaria es un nuevo reto.

El equilibrio entre la necesidad de más combustible para los cohetes y el incremento en el peso de la nave y el coste de despegue se ha de tener en cuenta.

“Tecnologías más avanzadas, como la nuclear o la propulsión sólida están lo suficientemente desarrolladas como para poder emplearlas.[...] Técnicas como el *aerobreaking*^a [18], misiones donde se mandan los equipamientos y cargas más pesadas antes para que después se envíen los astronautas en otra nave más rápida o el uso de dióxido de carbono para producir combustible [11], pueden reducir el coste de combustible y aumentar la velocidad de tránsito” [13].

Una vez que los astronautas estén en el espacio, necesitarán medidas de protección contra la radiación. También se tendrá que evaluar qué tipo de protección, si activa o pasiva, o bien un sistema híbrido que no implique añadir demasiado peso a la nave ni que dependa completamente de escudos que consuman energía [19].

Otro problema con el que se enfrentan los tripulantes es la gravedad cero en el espacio y la micro-gravedad que sufrirían en Marte. Los efectos que esto producen podrían ser reducidos con fármacos o ejercicio, o también se podría producir gravedad artificial con técnicas que van desde trajes que provocan cargas magnéticas o de presión hasta naves centrífugas [11], [19].

“En definitiva una misión con humanos a bordo es tecnológicamente viable, rentable, y segura para nuestros astronautas. [...] La misión generaría tecnologías innovadoras, mejorando las relaciones internacionales e inspirando a científicos e ingenieros de la próxima generación. Y todo se haría a un relativo bajo costo” [13].

2.3 Misión propuesta

El diseño de la estructura de este proyecto se basa en una serie de premisas y condiciones expuestas en el artículo “*Utilizing in-situ resources and 3D printing structures for a manned Mars mission*” [20] que se explicarán brevemente a continuación.

“Este artículo presenta un concepto basado en la reducción en los requerimientos de cantidad de masa y volumen que se lanzan en las misiones, mediante la fabricación de la mayoría de las estructuras de la base a partir de recursos in-situ.

^a Término que hace referencia a la técnica de vuelo espacial que reduce el punto más alto de una órbita elíptica, haciendo que el vehículo pase a través de la atmósfera en el punto más bajo de su órbita, de modo que el rozamiento resultante decelera la nave. [18]

Esta misión no pretende ser una misión inicial tripulada a Marte, sino como una misión a mayor escala y de larga duración que sucedería a previas misiones una vez que estas hayan sido completadas con éxito.” [20].

Para desarrollar todas las etapas de este proyecto se necesitan avances técnicos en varias áreas más allá de las típicas requeridas para misiones espaciales tales como el desarrollo de la fabricación aditiva (impresión 3D), que sería la técnica empleada para construir los módulos de la base.

“La misión propuesta consiste en, primero una misión no tripulada que sería enviada para construir las infraestructuras necesarias para albergar vidas humanas. Con dichas infraestructuras desplegadas y validadas, una segunda misión se prepararía para el lanzamiento. En esta última misión se llevarían a todos los miembros de la tripulación para habitar las construcciones realizadas por los robots en la primera misión” [20].

Obviamente se necesitan provisiones para la supervivencia de los astronautas, algunas de estas las llevarían consigo inicialmente para luego pasar a cultivar en alguna instalación hidropónica. De manera similar se haría con el aire que una vez traído de la Tierra se reciclaría y se generaría más a partir de la atmósfera y los materiales marcianos.

2.3.1 Condiciones en Marte

Las condiciones en Marte son duras para el cuerpo humano, a pesar de que el planeta presenta similitudes en la superficie con la Tierra, la temperatura, la delgada atmósfera presente y la consecuente exposición a los rayos cósmicos hacen de Marte un lugar hostil. Algunos parámetros a tener en cuenta en esta misión para la construcción de los módulos son:

- Una atmósfera que tiene una presión de **6.36 mb** de media, aproximadamente el 0,6% de la Tierra [21].
- Temperatura media de **-65 °C** (con comparación con los **15 °C** de la Tierra), con una variación de $\Delta T = 58 \text{ °C}$ [21].
- Atmósfera compuesta en un **95%** de **CO₂** [21], haciéndola irrespirable.
- Gravedad de **3.71 m/s²** (Marte/Tierra ratio 0.379) [21].
- Velocidad del viento: **2-7 m/s** (verano), **5-10 m/s** (otoño), **17-30 m/s** (tormenta de arena) [21].
- Densidad de la atmósfera en superficie: **~ 0.020 kg/m³** [21].

El suelo marciano contiene un 1% de agua que puede ser extraído aplicando calor [22]. También se podría extraer de las reservas de agua en los polos [23]. Y esta agua también podría separarse en hidrógeno para utilizarlo como combustible [24] y el O₂ para el aire en el interior de los módulos.

2.3.2 Necesidades de los astronautas

Los astronautas necesitarían habitáculos con temperatura controlada, presurizados con aire respirable, agua y comida, además de protección contra la radiación.

La protección contra la radiación es bien necesaria ya que la magnetosfera de Marte es mínima por lo que la cantidad de rayos cósmicos y radiación solar es alta [25]. Un astronauta en Marte sobrepasaría los límites de la NASA son **0.25 Sv**^b [26] en 30 meses o **0.5 Sv** anuales [27], este último se sobrepasaría en unos 10 meses [28].

Tabla 2. Dosis máximas de radiación recomendadas para un astronauta durante 10 años de servicio en Sieverts [29]

Edad (años)	1989		2000	
	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer
25	1,5 Sv	1,0 Sv	0,7 Sv	0,4 Sv
35	2,5 Sv	1,75 Sv	0,9 Sv	0,6 Sv
45	3,25 Sv	2,5 Sv	1,5 Sv	0,9 Sv
55	4,0 Sv	3,0 Sv	2,9 Sv	1,6 Sv

El espacio requerido por un astronauta se discute en [30] donde se revisan varias misiones previas y se concluye que los miembros de la tripulación necesitan unos **90 m³**, aunque para misiones de menor duración el espacio se podría reducir.

2.3.3 Impresión 3D in-situ (ISRU)

Una tecnología clave en esta misión es la impresión 3D con materiales in-situ (In Situ Resource Utilization). El material que se discute en este artículo es el **basalto**. Esta roca ígnea es muy abundante en Marte y tiene unas propiedades que la hacen especialmente interesante para este propósito. Algunas propiedades mecánicas son su Módulo de Elasticidad de **73 GPa** y una tensión máxima de **14 MPa** [31]. Estos valores lo hacen más elástico incluso que el acero.

El Basalto tiene propiedades de resistencia a la radiación [32] con un calor específico muy alto y una constante de permeabilidad muy baja [33], lo que lo hace adecuado para estructuras presurizadas.

Como algunos materiales, se puede jugar con los tiempos de enfriado para modificar la estructura cristalina obteniendo distintas propiedades. El basalto se funde a una temperatura de **1100 °C** [34], que puede variar según la composición exacta.

Con esta tecnología se puede fabricar piezas complejas reduciendo los costes de fabricación según qué piezas. Como ya se ha comentado en el capítulo 1, hay varios métodos de impresión, algunos de los más extendidos son: el Sinterizado Selectivo por Láser en el que se utilizan polvos que se van fundiendo selectivamente donde se quiera, y otro es el Modelado por Deposición Fundida donde se deposita capa a capa el material

^b Unidad de medida de la dosis de radiación absorbida por la materia viva. [26]

fundido [35]. Esta última técnica es la que se utilizará en este proyecto, y que se utiliza comúnmente para la mayoría de impresiones de termoplásticos mediante ordenadores de control numérico (CNC).

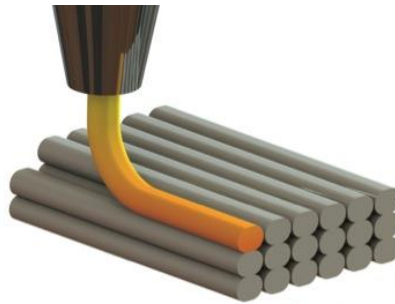


Figura 3. Representación de la técnica de modelado por deposición fundida [36]

En este caso con el basalto se necesitaría un cabezal que calentase el material hasta fundirlo y que además de soportar esas altas temperaturas resistiera también las presiones al extrudir el basalto una vez fundido [37].

El basalto una vez depositado se enfría rápidamente y estaría listo para su función sin necesidad de tratamientos posteriores.

2.3.4 Presurización

La parte de presurización es también muy importante, ya que las estructuras tendrán que soportar la presión interna mientras estén en servicio.

En este proyecto se propone una solución que consiste en que una vez erguidas las estructuras de basalto, se instalarían unas estructuras inflables en el interior de cada módulo [38]. Una aproximación a lo que sería una estructura interna inflable se puede ver en la siguiente figura:



Figura 4. Imagen de la secuencia de inflado de una estructura interna [39]

La estructura de basalto protegerá contra los agentes externos mientras la membrana interior retendrá la atmósfera adecuada para los astronautas.

2.3.5 Fases

2.3.5.1 Primera fase

En la primera parte de la misión, inmediatamente después del aterrizaje del módulo no tripulado se descargaría la nave y se prepararía la primera fase de impresión.

“Dentro de la nave espacial, una impresora 3D será preparada para empezar a imprimir con el basalto recolectado por los robots constructores. Los robots recolectan rocas de basalto y las cargan en una tolva, desde donde será alimentado el horno que derrita la roca para la impresión. La primera estructura que se creará será un domo grande que se usará para imprimir otros domos más pequeños. Después de que este esté construido, una gran impresora 3D de basalto será construida dentro. Esta impresora usará partes pesadas traídas en el primer cohete desde la Tierra como el cabezal, mecanismos de impresión y otros elementos para calentar el material” [20].

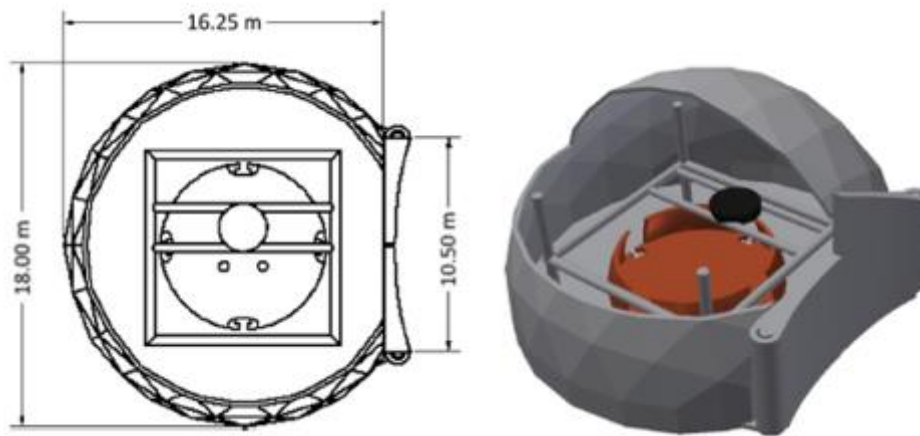


Figura 5. Esquema de una Impresora 3D dentro del Ag-domo [20]

“El primer domo será construido por piezas: triángulos de unos 2,4m de altura, que serán impresos o colados, dentro de la nave aterrizada y construido para después usarse como un domo multiuso (Ag-domo). [...]

El propósito principal de esta estructura es servir como escudo para la impresora contra los elementos en Marte. Una puerta doble exterior ayudará adicionalmente con la protección y permitirá que los domos menores salgan completos sin tener que desmontar el domo principal.

Después de que un número suficiente de domos sean producidos, el domo mayor será reconvertido en un área de cultivo agrícola” [20].

“El Ag-domo será construido por dos robots. El primero es un robot grande en comparación, que también será utilizado para recolectar el basalto y mover los domos más pequeños. [...]Un segundo robot es utilizado para colocar las capas más barras más altas y los triángulos entre ellas. [...]Además este último robot servirá para tareas de mantenimiento en el tiempo útil de las estructuras. [...]

Mientras que las características de la impresora 3D de basalto son desconocidas y será producto de futuro trabajo en esta tecnología, el impacto en la velocidad del domo será considerado” [20].

Tabla 3. Caracterización de la tasa de flujo de impresión (m^3/s) y el tiempo de fabricación (s) de un domo [20]

Flow Rate (m^3/s)	Time (s)	Time (h)
1.00×10^{-6}	3.14×10^7	8730
5.00×10^{-6}	6.28×10^6	1750
1.00×10^{-5}	3.14×10^6	873
5.00×10^{-5}	6.28×10^5	175
1.00×10^{-4}	3.14×10^5	87.3
5.00×10^{-4}	6.28×10^4	17.5
1.00×10^{-3}	3.14×10^4	8.73

Una posible configuración de la base se muestra en la Figura 4, que muestra como una fila puede ser desplazada para evitar las características del terreno.

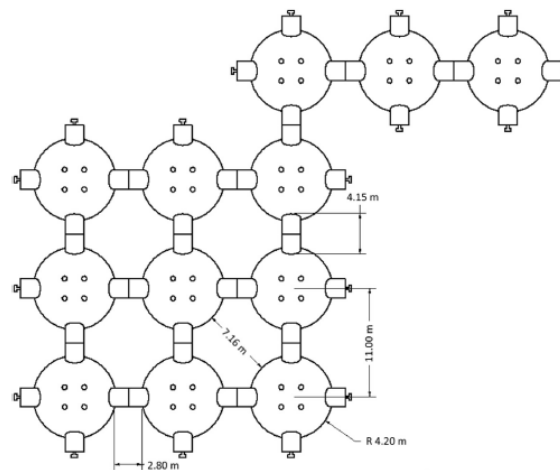


Figura 6. Esquema de la disposición de módulos de la base [20]

2.3.5.2 Segunda fase

“Los futuros ocupantes humanos de la base impresa de basalto deberían llegar y encontrar las estructuras casi preparadas para su ocupación. [...]”

El nivel de completitud de las estructuras será un factor clave en cuanto espacio temporal será necesario. Si una completa automatización fuera posible (y ningún margen de seguridad fuese necesario), entonces el módulo aterrizado podría proveer de asiento, espacio para los trajes y aire confinado para los astronautas.

Alternativamente, si a los astronautas se les exigiese realizar actividades de tratamiento de las estructuras para hacerlas viables a la presurización (como es el caso) [...], se necesitará significativamente más tiempo” [20].

2.3.6 Aproximación final

Finalmente, en este artículo se da un desglose aproximado de la cantidad de masa en kg que se necesitaría lanzar al espacio.

Tabla 4. Masa de los componentes (en **kg**) para la misión propuesta [20]

	Proposed approach
Surface systems	39,200
Science	1000
Robotic rovers	1500
Human rovers	5000
Habitat	4600
Power system	16,600
ISRU	2000
Basalt printer	5000
Other	3500
Ascent stages	0
Consumables	4000
Trans Mars Hab.	40,000
Total	83,200

Considerando el método de fabricación in-situ, y en comparación con otras misiones como la Mars One Project, este proyecto queda en buen lugar en términos de masa en total. Se excluye sin embargo la masa necesaria en la etapa de despegue, que de añadirse quedaría en lugar intermedio con respecto a otros, aunque a cambio se ofrecería mayor espacio útil.

“Este artículo ha provisto de un resumen de un potencial acercamiento en la exploración marciana por medio de la utilización in-situ de materiales a fin de reducir la masa en el despegue, en el tránsito espacial y en el volumen requerido” [20].

2.4 Tensegridad

El principio estructural en el que se basa el sistema que se propone es la *Tensegridad* (integridad tensional), que consiste en el uso de elementos aislados sometidos a compresión rodeados de una red continua tensada. Los componentes sometidos a compresión por lo general suelen ser barras que no se tocan entre sí y están unidos por otros componentes traccionados continuos, generalmente cables, formando una red.

Para demostrar este principio considérese la estructura más primitiva compuesta por tres elementos comprimidos (barras) y nueve tensionados (tendones). Se forman dos triángulos equiláteros con los cables y se disponen de forma paralela respecto de los planos que forman. Seguidamente se unen los vértices de los dos triángulos con los otros tres cables formando un prisma y por último se colocan las barras que van de un vértice, al vértice opuesto formando una diagonal en la cara rectangular del prisma formado. El resultado de esta configuración es la que se muestra en la siguiente ilustración:

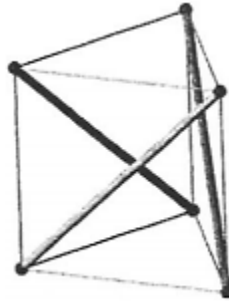


Figura 7. Estructura tensegrítica de tres barras [40]

Este prisma de barras y cables es el sistema tensegrítico más simple, no tiene ningún componente redundante. Los tendones más largos están inclinados debido a que el polígono superior y el de la base están rotados entre sí un ángulo α que es constante y dado por la fórmula:

$$\alpha = 90^\circ - 180^\circ/n \quad (1)$$

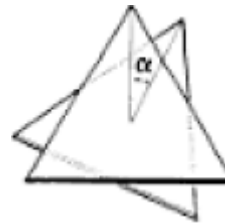


Figura 8. Rotación de polígonos [38]

Con n igual al número de lados del polígono formado. Y las dimensiones de los tendones más largos son dos tercios la longitud de las barras.

Una vez el último cable ha sido tensado, la estructura ganará resistencia y aguantará la deformación hasta el punto permitido por la elasticidad de los tendones.

Los vértices de este sistema se pueden imaginar como puntos de la superficie de una esfera que envuelve a la estructura, ya que están equidistantes del centro del prisma. Como se profundizará más adelante, podemos hacer el sistema tan esférico como queramos.

2.4.1 Tensegridad esférica

“Avanzando en el diseño del domo, se requiere una estructura tensegrítica cuyos patrones, al proyectarlos en la esfera que contiene a los vértices, la dividan en zonas simétricas. La estructura más simple que cumple esto emplea 6 barras dispuestas en pares paralelos. [...] Haciendo los tendones 0.6 veces la longitud de las barras. Cuando los 24 tendones están en su posición se encontrará que las barras están separadas a una distancia igual a la mitad de su longitud” [40]:



Figura 9. Tensegridad esférica de 6 barras [40]

“Cada barra está sujeta en su lugar por la acción cooperativa del sistema que comprende otros 29 miembros. [...] Descubrimos que cuando dos barras paralelas se mueven acercándose o alejándose entre ellas, los otros pares de barras lo hacen exactamente en la misma proporción” [40].

Cuando los tendones de una estructura tensegrítica están en tensados, están en un estado de equilibrio. Y en ese estado, si se estresa de alguna manera, siempre buscará el retorno. El sistema responde de tal manera que una fuerza local se distribuye de forma uniforme al conjunto de la estructura y por tanto se absorbe por cada una de sus partes.

De la misma forma que el primer prisma expuesto, esta estructura no tiene ninguna parte redundante. Si una sola barra o cable se elimina, todo el conjunto falla.

2.4.2 Grandes círculos

Viendo la simetría de esta configuración se podría pensar en rodear cada par de barras paralelas con un círculo que pasase por los vértices. Estos círculos se denominan *grandes círculos* (great circles).



Figura 10. Generación de grandes círculos [40]

Estos grandes círculos resultan ser los mismos que se obtienen de un octaedro regular cuando se proyectan sus lados en la esfera que pasa por sus 6 vértices, como se puede ver en las figuras.

Existen configuraciones equivalentes a esta, solo se necesitan poliedros cuyos lados proyectados en una esfera, resulten ser grandes círculos y además que sean exactamente

cuatro lados en cada vértice. Solo dos poliedros cumplen estas condiciones: el cuboctaedro y el icosidodecaedro.

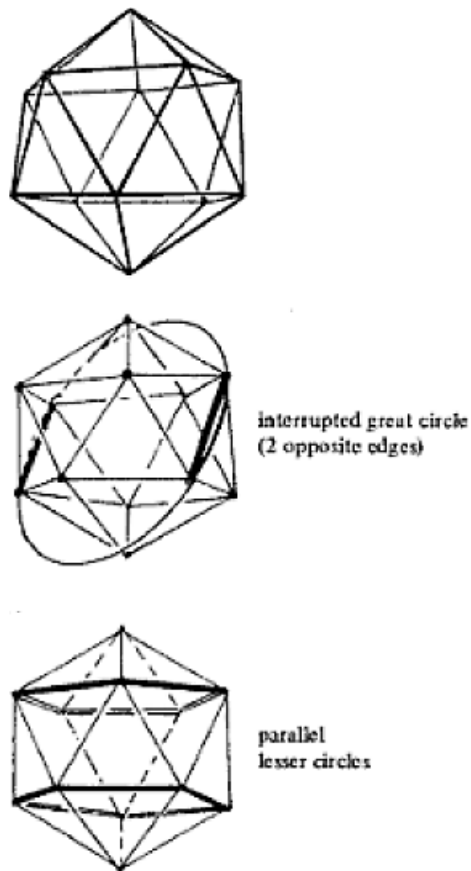


Figura 11. Familias de grandes círculos [38]

Si se cambia una de las condiciones y en vez de cuatro, se impone que sean cinco barras las que haya por cada vértice, se obtiene otro poliedro: el icosaedro, con veinte caras.

En este caso los grandes círculos también contienen la proyección de pares de lados opuestos. Solo que aparecen un mayor número de ellos al haber más pares de lados.

También aparece una serie de círculos menores que pasan por los vértices de las barras que forman un pentágono.

Si se truncara la figura por algunos de esos círculos menores veríamos ya la configuración de un domo geodésico básico.

Esta configuración será una opción a tener en cuenta para desarrollar el domo geodésico de nuestro módulo.

La elección de este tipo de poliedro se debe principalmente a que el icosaedro se aproxima más a la forma de una esfera, lo cual es una ventaja para el fin de la estructura que se

quiere diseñar. Al tener más vértices las barras se acortan y resulta una figura más rígida.

2.4.3 Subdivisión Geodésica

Si se aumenta el número de barras, se acorta su longitud, por lo que cada vez son menos diferentes a arcos. En definitiva, hacer la estructura cada vez más esférica, tiene grandes ventajas y hace que sistemas de mayor tamaño sean más prácticos.

Pero el abanico de poliedros disponibles condicionados por los grandes círculos y con sus caras iguales son escasos. Para obtener figuras más esféricas se utiliza un proceso llamado *subdivisión geodésica*.

Volviendo al octaedro que se ha generado anteriormente, se señalan los puntos intermedios de las aristas en cada cara y después se unen los puntos entre sí. Esto, por sí solo no mejora el prisma según nuestro objetivo, pero si desde el centro del poliedro se proyectan dichos puntos en la esfera que lo envuelve entonces estos estarán a la misma distancia del centro que los vértices, manteniendo las barras rectas.

Esto produciría una superficie más suavizada y más parecida a una esfera, como podemos ver en esta ilustración:

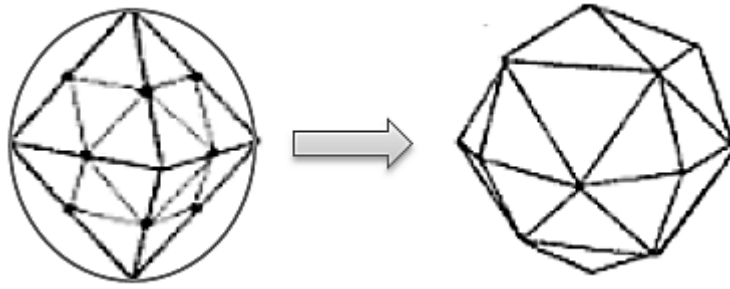


Figura 12. Proyección de vértices en la esfera [40]

Al proyectar estos puntos y convertirlos en nuevos vértices, las longitudes de las aristas cambian y ya las caras no son iguales. Solo se mantienen equiláteros los triángulos centrales (8 triángulos) y los demás quedan isósceles (24 triángulos).

A este proceso de subdivisión se le llama división de *frecuencia dos* (2V) del octaedro, y el poliedro resultante será por tanto un *octaedro de frecuencia dos*. Y es claro también que, a mayor frecuencia, es decir mayor división de las aristas, más suaves son los arcos y menos difieren los triángulos entre sí.

Teóricamente no hay límite en cuanto al número de subdivisiones que se podrían hacer de las aristas. Pero comprensiblemente cuanto más grande el número de divisiones, más suave será la superficie del domo, coincidiendo con la esfera en el caso de infinito número de divisiones.

El mismo procedimiento se puede seguir con el icosaedro que se ha mencionado anteriormente. Si se dividieran las aristas en tres quedaría la siguiente configuración:

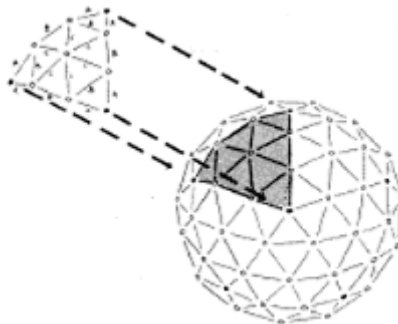


Figura 13. Subdivisión del icosaedro [40]

Si se compara con la misma frecuencia ambos poliedros obtenemos la siguiente tabla:

Tabla 5. Comparación de poliedros

Nº	3v Icosa	3v Octa
Lados	270	108
Vértices	92	38
Caras	180	72

Como se puede observar inmediatamente, para una misma frecuencia, el icosaedro tiene más del doble de lados, vértices y caras. Lo que es esperable ya que el icosaedro es ya de por sí más aproximado a una esfera. Para que un octaedro pudiese ser comparable a un icosaedro de 3V tendría que ser de frecuencia 5V.

Al tener más vértices también se tienen familias de *grandes círculos* más grandes. Por ejemplo, si en el icosaedro se gira la figura sobre el eje que va a través de dos vértices opuestos se obtienen 6 grandes círculos y si lo se gira sobre los puntos opuestos intermedios de cada arista se obtienen 15 grandes círculos, a diferencia del octaedro con el que se tendrían 10.

Se podría hacer esto con cada una de las frecuencias de cada poliedro y se obtendrían muchos más, así se comprueba que, para frecuencias pares en el icosaedro existen grandes círculos que actúan como ecuadores teniendo un vértice en el cénit de la figura. En el octaedro también existen estos ecuadores en todas las frecuencias.

Esto tiene una importancia clara y es que, si el objetivo es el de obtener un domo geodésico que actúe como una estructura tensegrítica, se ha de ajustar lo máximo posible a la figura geométrica exacta. Para ello se necesita que haya un plano en el que la proyección de las aristas en la esfera y uno de los grandes círculos coincida. Es decir, se requiere que exista un plano por el que cortar y que sirva de base de la estructura, para no tener que modificar la longitud de las barras al apoyar la estructura sobre el suelo.

Existen también diferentes formas de unir los puntos obtenidos al dividir las aristas. Al método que se ha mostrado anteriormente se le llama *Clase I*. Otro método sería trazar líneas perpendiculares a las aristas por esos puntos, esto se conoce como *Clase II*.

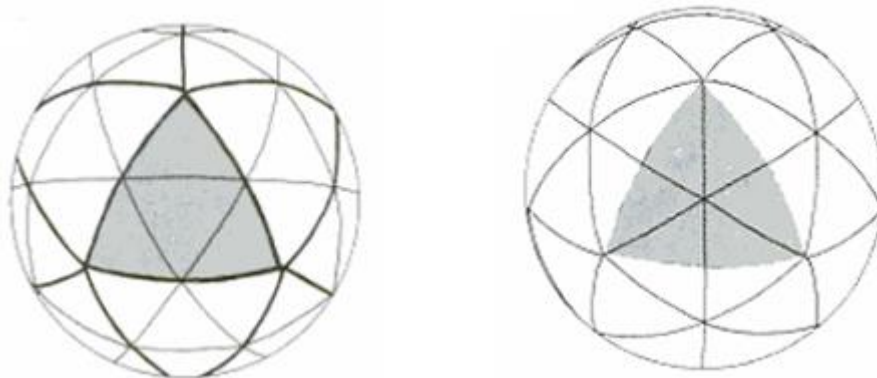


Figura 14. Clase I y Clase II [40]

La ventaja de la Clase II es que hay menos triángulos diferentes y por tanto menos aristas diferentes. Pero por otra parte los grandes círculos cambian y ya no se cumple las características que se mencionaban antes.

2.4.4 Factores de cuerda

La longitud de las barras también cambia según el tipo y el número de subdivisiones. Como se puede comprobar en la figura siguiente, si α es el ángulo entre la línea que marca la dirección de proyección del punto y r es la distancia del punto al centro del prisma (igual al radio de la esfera), entonces la longitud de la barra entre los puntos es r multiplicado por $2 \cdot \sin(\alpha/2)$. Dos veces el seno de la mitad del ángulo α es lo que se conoce como *factor de cuerda*.

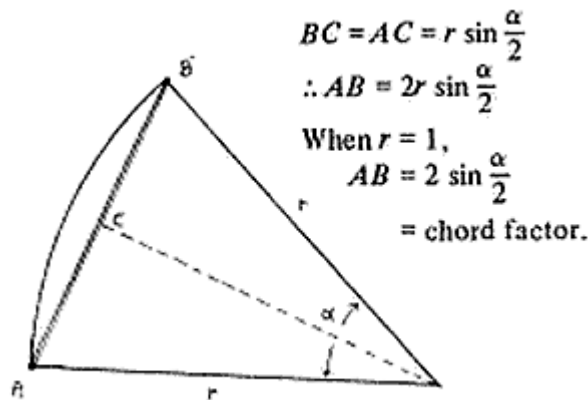


Figura 15. Factor de cuerda [40]

Esto da una herramienta muy útil, ya si sabemos los factores de cuerda de una esfera de una subdivisión y frecuencia dada que se puede proceder a duplicarla a prácticamente cualquier tamaño. Además, si se conocen los ángulos de las líneas de proyección, se podría variar el radio uniformemente de punto a punto, no habría necesidad de restringir las estructuras geodésicas a que sean solamente esféricas. Permitiéndose el diseño de domos ovalados.

2.4.5 Elección del poliedro

Con todos estos datos ya se pueden comparar ambos poliedros y decidir cuál es el más apto para nuestro fin.

Características útiles del octaedro [40]:

- Ecuador natural en todas las frecuencias
- Contiene aperturas cuadradas que serían una ventaja para puertas o ventanas
- Generación simple de contornos
- Plano de corte en todas las frecuencias en el que podríamos encajar la mitad de un domo en una estructura rectangular

Características útiles del icosaedro:

- Menor frecuencia para factores de cuerda comparables
- Ángulos más uniformemente distribuidos entre los triángulos casi equiláteros.
- Menor variación de la longitud de las barras para factores de cuerda comparables (1.18:1 para 3v icosa, 1.5:1 para 5v octa)
- Curvatura más uniformemente distribuida (los vértices del octaedro son casi planos, de ahí que sean áreas potencialmente débiles)
- En general mejor apariencia

Considerando estas ventajas y habiendo comparado las mismas técnicas de subdivisión a ambos poliedros, se impone el icosaedro. Se ajusta más al objetivo de construir una estructura que soporte bien las cargas y la presión.

Una vez se ha decidido el poliedro queda decidir el método de subdivisión y la frecuencia.

La Clase II tiene ventajas económicas, produciendo triángulos más grandes para las mismas frecuencias que la Clase I, lo que deriva en menos componentes y también menos componentes diferentes. Aunque se tiene el problema de que no se puede trincar la estructura por la mitad, ya que cualquier ecuador corta algunos de los triángulos subdivididos. Es por eso y por la sencillez de generar los triángulos que nos decantamos por la Clase I.

En cuanto a la frecuencia, cuanto más pequeña la cara del poliedro que se subdivide menor es la frecuencia que se necesita para una esfericidad aceptable. Asimismo, cuanto mayor sea la estructura a construir, mayor tendrá que ser la frecuencia necesaria. Hay que destacar que, a mayor frecuencia, mayor variedad de barras diferentes hay que usar.

Se busca construir un domo práctico, ni demasiado obtuso ni demasiado alto, así que una buena medida sería algo parecido a una semiesfera. Como ya se ha comentado antes, para un icosaedro con subdivisión de Clase I, solo existen ecuadores para frecuencias pares. Así que solo queda escoger un icosaedro, Clase I de frecuencia 2V, 4V, 8V, etc.

Una frecuencia 2 sería fácil de calcular y sin muchos elementos diferentes, pero poco fiel a la forma esférica que se busca. En cambio, de 4V en adelante sí que se aprecia una superficie mucho más suavizada, pero para frecuencias 8, 16 se utilizarían demasiadas longitudes diferentes y los nodos estarían demasiado juntos haciéndolos casi planos y además se gastaría mucho en material, dejando de ser una ventaja utilizar este tipo de estructura.

Por todo ello se llega a la conclusión de que la mejor estructura para las especificaciones es un domo geodésico de frecuencia 4V obtenido a partir de un icosaedro subdividiendo sus caras según el método Clase I, que se muestra en la siguiente imagen:

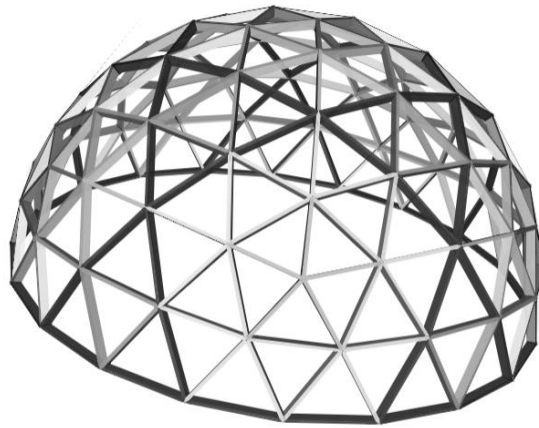


Figura 16. Domo geodésico a partir del icosaedro 4V, Clase I [41]

2.5 Comportamiento dinámico del domo

La ventaja principal de usar triángulos en esta estructura es que resulta ser una estructura isostática, es decir su grado de hiperestatismo global es cero, por lo que se puede resolver con las ecuaciones de equilibrio de la estática.

$$\Sigma \vec{F} = 0 \quad \vec{M} = 0 \quad (2)$$

El triángulo es el único polígono que no se deforma al aplicarle cargas. Si sometiéramos a un triángulo a una carga puntual en cualquiera de sus vértices en la dirección perpendicular del lado opuesto, observaríamos como los lados adyacentes al vértice elegido estarían sometidos a un esfuerzo de compresión, mientras que el lado opuesto lo estaría a tracción.

Si esta observación se traslada a toda la estructura completa se puede comprobar cómo, si aplicamos cargas verticales en los vértices, éstas se transmitirán a lo largo de las barras más alineadas en dirección radial hacia el suelo, sometiendo a todas ellas a compresión. Y las barras más alineadas transversalmente estarán traccionadas.

Esto ocurriría en el caso de que aplicáramos exclusivamente cargas verticales, como sería en el caso de que el domo de este proyecto no necesitase presurización. Al no ser así y someter la estructura también a cargas muy superiores a las del peso en dirección perpendicular a la esfera y hacia fuera, el sistema no se comporta igual. En este caso todas las barras están sometidas a tracción.

Esto es cierto para un domo geodésico completo. Más adelante se comprobará que en la configuración final diseñada también hay barras sometidas a esfuerzos de compresión.

El módulo debe ser rígido para soportar elementos como la presurización, posibles impactos de meteoritos y además servir de barrera contra la radiación y proporcionar un espacio diáfano donde se puedan desarrollar las actividades convenientemente.

2.6 Método de los elementos finitos

El análisis de la estructura se hará por el método de los elementos finitos. Este método consiste en dividir la estructura en elementos más simples, todo lo pequeños que queramos, y que se conectan unos a otros por nodos. De este modo se pasa de analizar un sistema continuo que se rige por una ecuación diferencial o un sistema de ellas a un sistema con un número de grados de libertad finito y que se rige por un sistema de ecuaciones lineales o no [42]. Hay que tener en cuenta que este método de análisis numérico es una aproximación.

En cualquier modelo que se analizado, se puede distinguir: la representación geométrica de lo que se quiere estudiar, las cargas y las restricciones impuestas al modelo y finalmente, las incógnitas que son de interés y que se desean conocer.

Este método tiene tres fases principales. La primera fase de este método es el pre-proceso donde se diseña la geometría de nuestro sistema a analizar y se discretiza en una serie de elementos “finitos” (conocido como mallado). También se concretan las propiedades del material con el que se va a construir, las condiciones de contorno (Apoyos, Encastre, etc.), las cargas y otras condiciones.

Esta fase es la más importante del proceso. Es necesario hacer hipótesis simplificadoras ya que el problema real es siempre más complejo. El resultado final dependerá mucho tanto de las hipótesis propuestas, como de la discretización del problema [43].

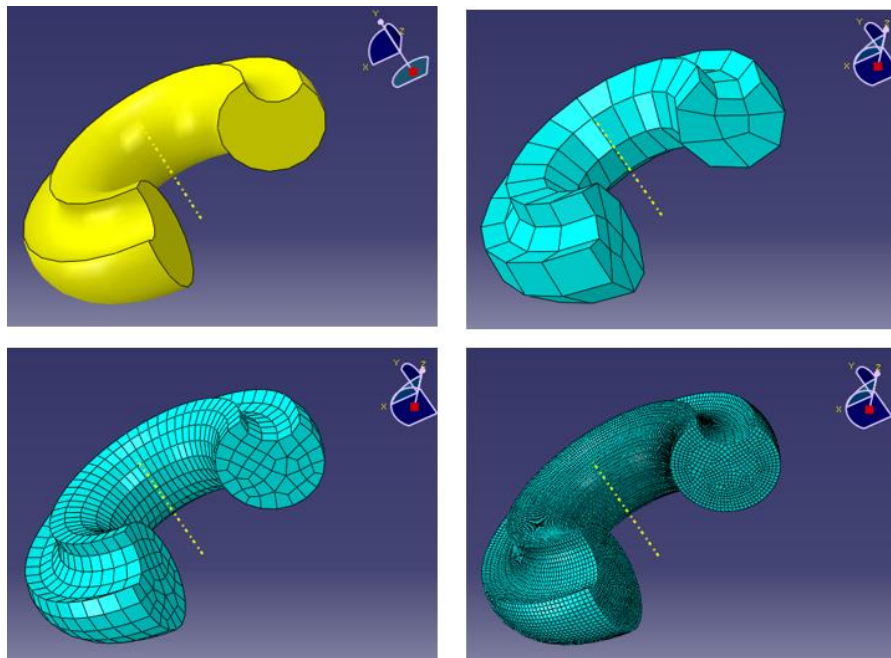


Figura 17. Secuencia de mallado con distinto tamaño de celdas

Seguidamente se realiza el procesamiento de las ecuaciones generadas por el preprocesador con las incógnitas que sean de interés.

Por último, tiene lugar el postproceso donde se pueden visualizar los resultados obtenidos de las incógnitas que sean de interés, en el caso de un análisis estructural se analizan las tensiones deformaciones o desplazamientos, en este proyecto se analizarán principalmente las tensiones generadas en la estructura.

En este trabajo se utilizará el software de cálculo *Abaqus*, en la versión estudiante. Debido al uso de esta versión, se tienen varias restricciones, por ejemplo, a la hora de afinar el mallado, teniendo un límite de 1000 nodos.

DISEÑO DEL DOMO

3.1 Introducción

Para fabricar este módulo, hay que concretar primero las dimensiones y saber bien la disposición espacial de cada uno de los puntos obtenidos al proyectar sobre la esfera.

Con el objetivo de ir paso a paso e ir diseñando justificadamente la estructura y ser lo más fieles posibles a las proporciones geométricas de los domos geodésicos, se ha optado por hacer un diseño inicial básico que constará de un domo geodésico completo sin ningún acceso ni ninguna parte truncada y posteriormente se modificará obteniendo una estructura final más compleja.

Estos diseños se concebirán en dos fases de construcción: la primera fase consistirá en construir el domo sencillo y exactamente igual que la figura geométrica, y la segunda fase en la que se añadirán estructuras complementarias que servirán de comunicación con futuros módulos.

En la primera fase se diseñará la cúpula que será la parte principal de la estructura final. Esta estructura por sí sola y una vez terminada se podría considerar ya habitable, por lo que podría constituir un diseño definitivo para alguna finalidad concreta en la que no se necesiten accesos.

Una vez se ha diseñado la primera parte, en la segunda fase se le añadirán componentes a modo de pasillos que se utilizarán entre los módulos y como acceso desde el exterior.

Como en las distintas fases, la estructura soportará diferentes cargas, en los capítulos posteriores tendrá lugar el dimensionamiento de las barras de cada estructura. Se deben dimensionar las barras con las secciones adecuadas de tal manera que las barras soporten las cargas a lo largo de todas las fases de construcción.

El dimensionamiento final de estas se hará una vez se incorporen los pasillos, y se adjudicará las secciones más grandes que se hayan estudiado en ambas fases. Por ejemplo, en la primera fase se soportará un peso y una carga de presurización menores que en caso final, debido a su menor tamaño y superficie.

El motivo de este procedimiento es el comportamiento de este tipo de estructura según se le apliquen las cargas y que barras se trunquen. Como se ha explicado en el capítulo anterior, la integridad de estas estructuras depende de cada uno de sus elementos. Por lo que aplicar distintas cargas en distintas zonas, supone una distribución de las tensiones muy distinta de una fase a otra.

3.2 Primera fase: Diseño inicial

Para ello se empleará el sistema de coordenadas esférico en el que se utilizan dos ángulos ϕ y θ , junto a una distancia r , que especificarán un punto único.

La coordenada ϕ representa un meridiano de longitud y la coordenada θ en cambio representa una latitud específica, pero con la peculiaridad de que en este caso el ángulo 0° estará en el cénit y aumentará hacia abajo.

Todos los puntos con el mismo ángulo ϕ se encuentran en el mismo gran círculo que pasa por el cénit (0,0). Y los puntos con el mismo ángulo θ estarán, bien en el ecuador, o bien en un círculo menor por el que la figura podría ser truncada y se podría apoyar en una superficie plana. Como el domo escogido es semiesférico el ángulo θ máximo será de 90° , que serán los puntos que se fijarán al suelo.

La coordenada r es medida en unidades de longitud y que en este caso es constante. Si la superficie que lo envuelve no fuera esférica habría que tener en cuenta la variación de r en cada punto. Para dos puntos con coordenadas $\phi_1 \theta_1 r_1$ y $\phi_2 \theta_2 r_2$, podríamos calcular la distancia entre ellos con la siguiente formula:

$$d = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2 r_1 r_2 \{ \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \cos(\phi_1 - \phi_2) \sin \theta_1 \sin \theta_2 \}} \quad (3)$$

En este caso se simplificaría ya que podríamos sustituir $r = r_1 = r_2 = 1$.

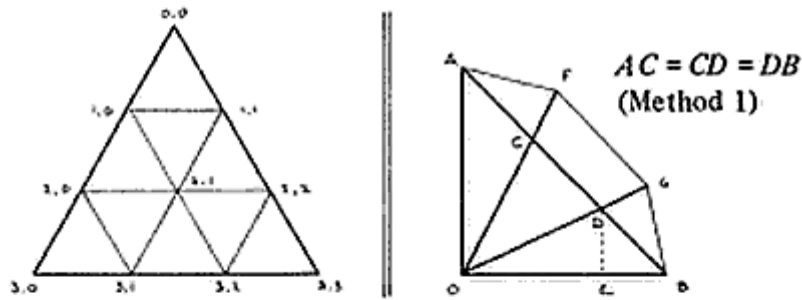
Aunque se podría utilizar el método geométrico con el que explicamos los factores de cuerda en el anterior capítulo, se complicaría demasiado para altas frecuencias.

Con el sistema esférico en cambio se permite un proceso normalizado en los que todos los factores de cuerda no dependen del punto anterior y por tanto no se arrastran posibles errores.

3.2.1 Métodos de proyección

Existen dos métodos con los que proyectar los puntos sobre nuestra esfera. El primer método consiste en proyectar los puntos que previamente se han obtenido mediante la subdivisión Clase I.

Como se puede observar en la figura, para el caso de una cara de un octaedro 3V, esto lleva a una deformación de las divisiones. Mientras que las secciones AC, CD, DB son iguales AF, FG, GB no lo son.

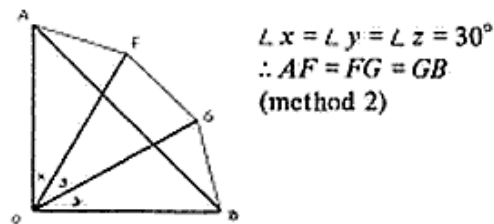


$$\begin{aligned}
 AB &= 1 \quad DB = CD = AC = 1/3 \quad OB = 1/\sqrt{2} \\
 DE &= EB = 1/3 \sin 45^\circ \\
 OE &= OB - EB = 1/\sqrt{2} - 1/3 \sin 45^\circ \\
 \therefore \angle DOB &= \arctan (1/3 \sin 45^\circ) / (1/\sqrt{2} - 1/3 \sin 45^\circ) \\
 &= 26.5650512^\circ \\
 \angle COD &= 90^\circ - 2 \angle DOB = 36.8698977^\circ \\
 O &= \text{Octa Center} \\
 AB &= \text{Octa Edge} \\
 AFGb &= \text{Projection onto sphere}
 \end{aligned}$$

method 1 coordinates			chord factors	
	ϕ	θ		
0,0	0	0	0,0/1,0	0.459506
1,0	0	26.5650512	1,0/2,0	0.632456
1,1	90	26.5650512	1,0/1,1	0.632456
2,0	0	63.4349488	2,0/2,1	0.671421
2,1	45	54.7356103		

Figura 18. Método I [40]

El segundo método consiste en separar los ángulos equitativamente, es decir 30° , 60° y 90° , haciendo que las barras una vez proyectadas, sean de la misma longitud.



method 2 coordinates			chord factors	
	ϕ	θ		
0,0	0	0	0,0/1,0	0.517638
1,0	0	30	1,0/1,1	0.707107
1,1	90	30	2,0/2,1	0.650115
2,0	0	60		
2,1	45	54.7356103		

Figura 19. Método II [40]

Cuanto más cercanos a triángulos equiláteros sean las subdivisiones, más equilibrada debiera ser su resistencia a tracción y compresión desde varias direcciones. Pero puesto que el Método I es el que utiliza la subdivisión que hemos escogido anteriormente, nos ceñiremos a él para nuestro domo.

3.2.2 Asignación de puntos

Ya se tiene todo lo que se necesita para comenzar a calcular cada uno de los puntos del sistema. Se empezará por nombrar cada uno de los puntos con un sistema de numeración en el que se tendrán dos coordenadas n, n .

Se comienza por dibujar el triángulo de una de las caras de nuestro icosaedro, se subdividen los lados en $n=4$, y se unen los puntos, según nuestro patrón (Clase I, 4V).

Ahora, empezando por el vértice superior al que se ha nombrado como 0,0, cada fila de puntos hacia abajo ira incrementando en una unidad la primera coordenada y cada punto de cada fila de izquierda a derecha aumentará en una unidad la segunda coordenada de manera que el último punto de la última fila tendrá los dígitos $n, n = 4,4$. Se construye así un patrón que nos ayudará a guiarnos en toda la estructura:

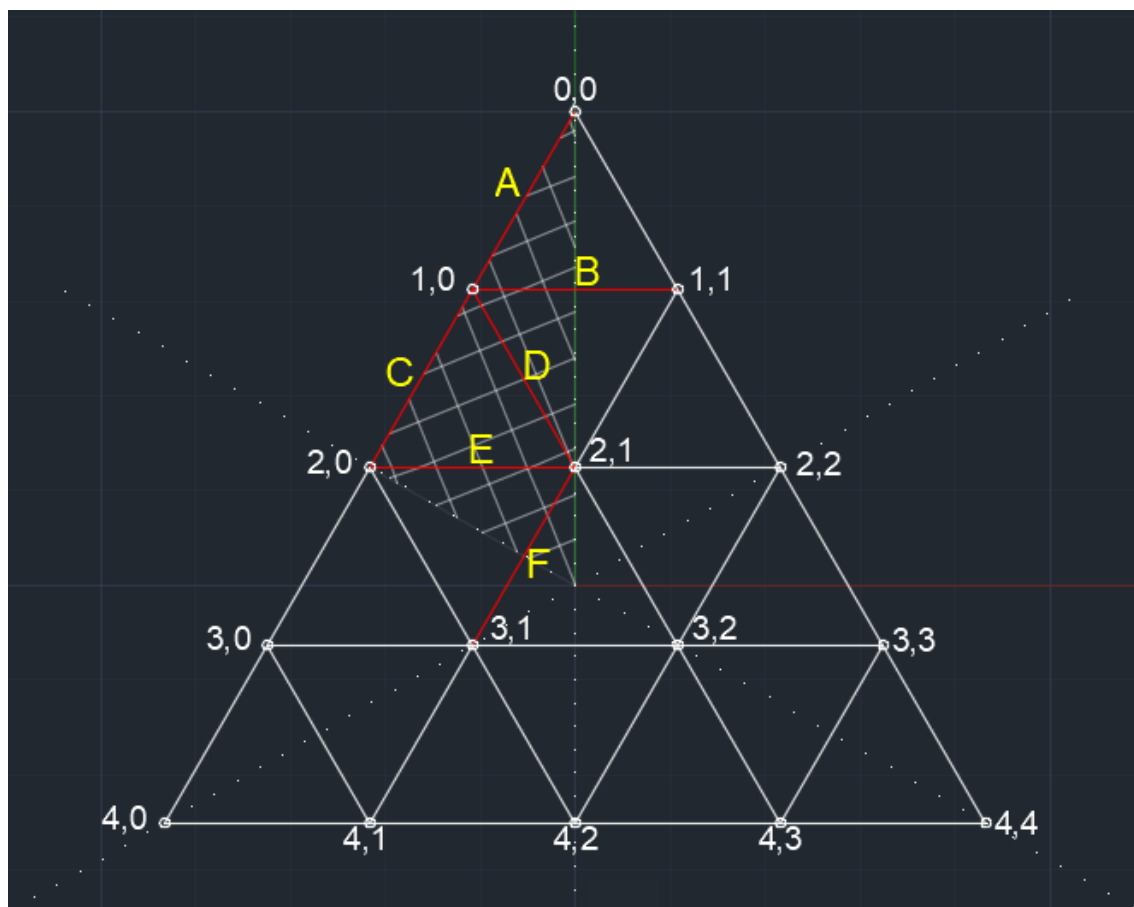


Figura 20. Guía para nombrar los vértices

Se observa que en el triángulo existen tres ejes de simetría indicados con líneas de puntos (90° , 30° , -30°), que dividen el triángulo principal en tres pares de triángulos simétricos. Así que se podría generar el triángulo completo solo con la zona que se encuentra cuadrículada en la parte superior izquierda, a esto se le llamará *triángulo de simetría*.

3.2.3 Simetría

Si la estructura planeada es esférica (nuestro caso), solo se necesitarán factores de cuerda para las barras que estén parcial o enteramente dentro del triángulo de simetría. En otras palabras, solo se tendrá que calcular la longitud de las barras que se encuentren dentro de ese triángulo. En este caso esas barras están señaladas en rojo en la imagen y nombradas alfabéticamente de A a F.

La simetría no solo existe dentro del triángulo, sino que todo el icosaedro tiene varios planos de simetría marcados por los grandes círculos. El icosaedro tiene en total unos 31 grandes círculos, y todos ellos se pueden especificar solamente con el triángulo de simetría, cuyos lados proyectados forman parte de tres grandes círculos.

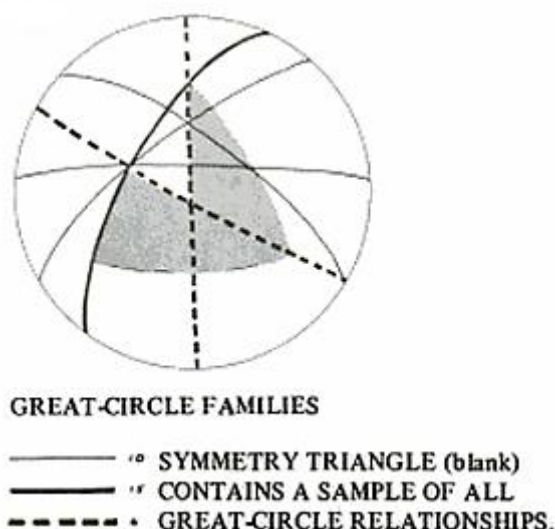


Figura 21. Familias de grandes círculos [38]

“Sistemáticamente rotado y reflejado seis veces por cada una de las caras del icosaedro ($6 \times 20 = 120$ veces), ese triángulo reconstruye el sistema de grandes círculos completo. Esa pequeña área contiene toda la información que necesitamos para subdividir una esfera con sistemas de grandes círculos. Cualquier subdivisión posterior que hagamos dentro de ese triángulo será propagada por todo el sistema” [40].

Esto se traduce en que para todo el diseño solo se necesitaran 6 longitudes de barras diferentes: A, B, C, D, E y F.

Continuando con la construcción del domo y el nombramiento de los puntos, se irá rotando y reflejando el triángulo de simetría hasta obtener la estructura completa. Se llamará a este triángulo principal: triángulo #1. Al simétrico con respecto al eje de la base #2 y se nombrarán los puntos con la misma regla anterior.

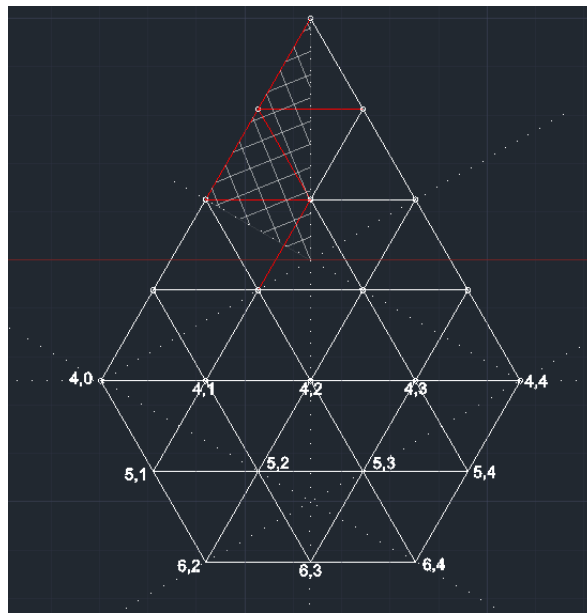


Figura 22. Generación del triángulo #2

Esta forma se repite cinco veces a lo largo de toda la estructura, una por cara que se coinciden en el vértice 0,0, en el cenit. Por ello se utilizarán las mismas coordenadas n para todos, pero especificando el número de triángulo.

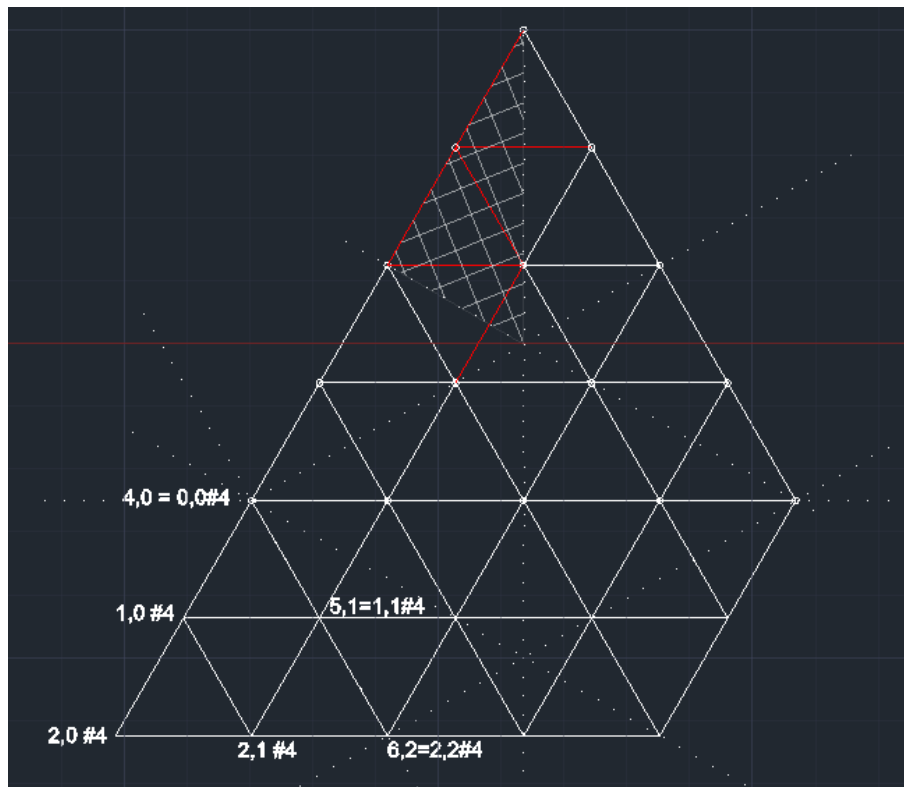


Figura 23. Generación del triángulo #4 repitiendo parte del #1

La numeración de los triángulos es la siguiente:

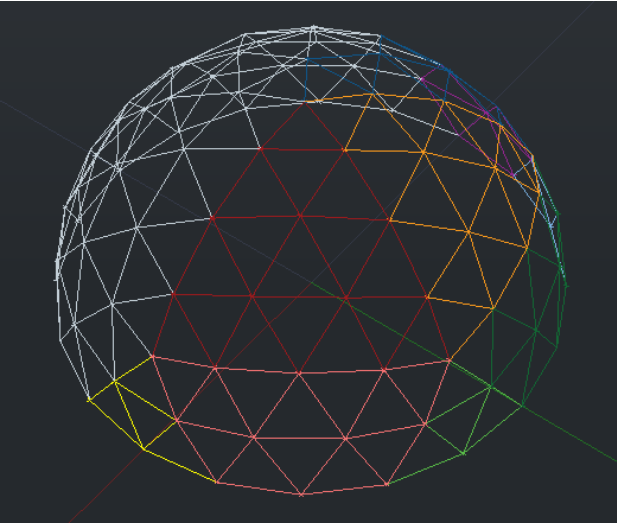


Figura 24. Triángulos #1 #2 y #4

Triángulo#1
Triángulo#2
Triángulo#4

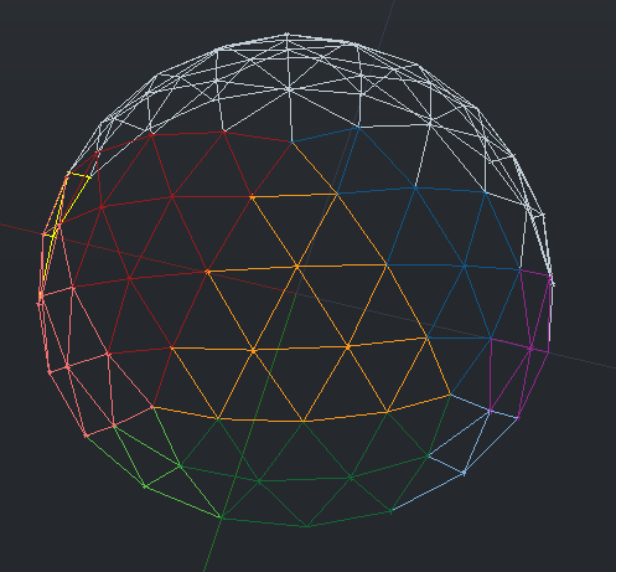


Figura 25. Triángulos #3 #5 y #6

Triángulo#3
Triángulo#5
Triángulo#6

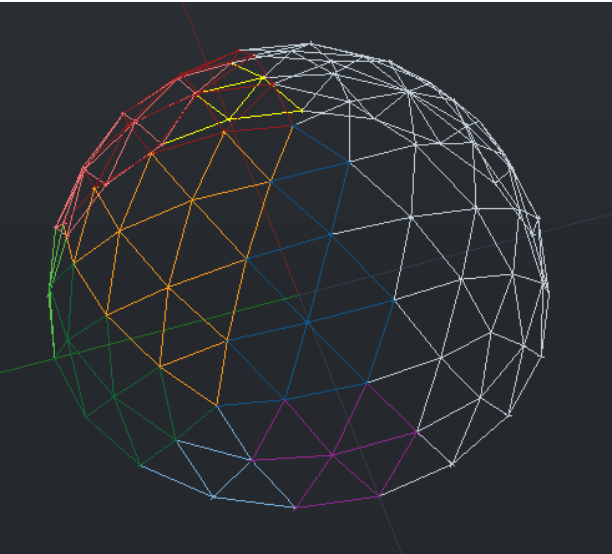


Figura 26. Triángulos #7 #8 y #9

Triángulo#7
Triángulo#8
Triángulo#9

No se nombran más triángulos a partir de la mitad, es decir, cuando se llevan recorridos 180 grados desde el meridiano $[n,0]$, porque existe un plano de simetría en el icosaedro que pasa precisamente por ese meridiano. No es casual que este plano sea el que contenga uno de los tres grandes círculos que encierra al triángulo de simetría.

Este divide la estructura en dos mitades exactamente iguales por lo que no es necesario calcular nada más que la mitad del domo. El plano coincide con el plano XZ, así que solo se deberá que cambiar el signo de la coordenada “y” de todos los puntos en el sistema cartesiano.

3.2.4 Longitud de barras y puntos

Ya se está listo para calcular los puntos y las longitudes de cuerda. Para ello se necesitarán cada uno de los factores de cuerda correspondientes a cada barra.

“Cada cara tiene realmente 6 triángulos de simetría y conseguiríamos los mismos factores de cuerda con cualquiera de ellos, pero usamos el de arriba a la izquierda porque los números que hay que manipular son más prácticos si nos ceñimos al lado izquierdo, donde los valores del ángulo ϕ son cero, y hacia arriba (0,0) donde los valores de θ son más pequeños” [40].

Para calcular cada uno de los puntos se usarán unas tablas que contienen los ángulos ϕ y θ de cada uno de los puntos de nuestro domo. Estas tablas están disponibles en el libro “*Geodesic Math And How To Use It (Hugh Kenner)*” [40] y proporcionan las coordenadas en el sistema esférico de las diferentes configuraciones, poliedros y métodos de subdivisión. Las correspondientes al caso (Icosaedro, Clase I, 4V) se adjuntarán en los *Anexos*.

Se necesita saber pues, las longitudes de las únicas 6 barras diferentes de las que consta todo el domo. Cada una de ellas requiere dos puntos, compartiéndose uno de ellos con la siguiente barra, así que se deberán calcular 6 puntos, quedando la hoja de trabajo de la siguiente manera:

Tabla 6. Posición de los puntos principales

Segmentos	Vértices	Esféricas(°)	
		ϕ	θ
0,0/1,0	0,0/	0	0
1,0/1,1	1,0/	0	14,5454366
1,0/2,0	1,1/	72	14,5454366
1,0/2,1	2,0/	0	31,7174744
2,0/2,1	2,1/	36	26,5650512
2,1/3,1	3,1/	22,3861776	43,6469271

Para calcular los segmentos se fija nuestro radio de la esfera que envuelve al domo. Según las necesidades de los astronautas y la información que ya se ha comentado en el capítulo anterior, se ha decidido fijar el radio en **4,5 metros**.

Como la estructura es esférica, usamos la ecuación (4) que ya indicamos en el epígrafe anterior, pero para el caso esférico ($r_1 = r_2 = 1$) y calcular los factores de cuerda.

$$d = \sqrt{2 - 2 \{ \cos\theta_1 \cos\theta_2 + \cos(\phi_1 - \phi_2) \sin\theta_1 \sin\theta_2 \}} \quad (4)$$

Tabla 7. Longitud (m) de las barras principales

Radio domo (m)	Factor de cuerda	Longitud de barra (m)	Nombre Barras	Segmentos
4,5	0,253	1,139	A	0,0/1,0
	0,295	1,329	B	1,0/1,1
	0,299	1,344	C	1,0/2,0
	0,295	1,325	D	1,0/2,1
	0,313	1,408	E	2,0/2,1
	0,325	1,462	F	2,1/3,1

Se puede obtener el resto de coordenadas directamente de las tablas. Debido a un requisito del software que se usará para el posterior análisis de la estructura, se necesitan los puntos en coordenadas cartesianas. Con las ecuaciones de cambio de coordenadas se obtiene el resto de puntos que nos interesan.

$$x = r \sin\theta \cos\phi \quad y = r \sin\theta \sin\phi \quad z = r \cos\theta \quad (5)$$

Tabla 8. Coordenadas cartesianas de los vértices del domo

	Cartesianas (m)			Vértices
	x	y	z	
Triangulo #1	0	0	4,5	0,0/#1
	1,130	0	4,356	1,0/#1
	0,349	1,075	4,356	1,1/#1
	2,366	0	3,828	2,0/#1

	1,628	1,183	4,025	2,1/#1
	2,872	1,183	3,256	3,1/#1
	0,731	2,25	3,828	2,2/#1
	3,39	0	2,96	3,0/#1
	2,012	2,366	3,256	3,2/#1
	1,048	3,225	2,959	3,3/#1
	4,025	0	2,012	4,0/#1
	3,74	1,075	2,26	4,1/#1
	3,097	2,25	2,366	4,2/#1
	2,178	3,225	2,26	4,3/#1
	1,244	3,828	2,012	4,4/#1
Triangulo #2	4,305	0,665	1,13	5,1/#2
	3,878	1,914	1,244	5,2/#2
	3,019	3,097	1,244	5,3/#2
	1,962	3,889	1,13	5,4/#2
	4,28	1,391	0	6,2/#2
	3,641	2,645	0	6,3/#2
	2,645	3,641	0	6,4/#2
Triangulo #3	0	0	4,5	0,0/#3
	0,349	1,075	4,356	1,0/#3
	-0,914	0,664	4,356	1,1/#3
	0,731	2,25	3,828	2,0/#3
	-0,622	1,914	4,025	2,1/#3
	-0,238	3,097	3,256	3,1/#3
	-1,914	1,391	3,828	2,2/#3
	1,048	3,225	2,959	3,0/#3
	-1,628	2,645	3,256	3,2/#3
	-2,743	1,993	2,959	3,3/#3
	1,244	3,828	2,012	4,0/#3
	0,133	3,889	2,26	4,1/#3
	-1,183	3,641	2,366	4,2/#3
	-2,394	3,068	2,26	4,3/#3
	-3,256	2,366	2,013	4,4/#3
Triangulo #4	4,305	-0,664	1,13	1,0/#4
	4,305	0,664	1,13	1,1/#4

	4,5	0	0	2,1/#4
	4,28	-1,391	0	2,0/#4
Triangulo #5	0,698	4,299	1,13	1,1/#5
	1,391	4,28	0	2,1/#5
	0	4,5	0	2,2/#5
Triangulo#6	-0,622	4,28	1,244	5,2/#6
	-2,012	3,828	1,244	5,3/#6
	-3,092	3,068	1,13	5,4/#6
	-1,391	4,28	0	6,3/#6
	-2,645	3,641	0	6,4/#6
Triangulo#7	-3,873	1,993	1,13	1,1/#7
	-3,641	2,645	0	2,1/#7
	-4,28	1,391	0	2,2/#7
Triangulo#8	-2,012	0	4,025	2,1/#8
	-3,019	0,731	3,256	3,1/#8
	-3,657	1,329	2,26	4,1/#8
	-3,828	0	2,366	4,2/#8
Triangulo#9	-4,262	0,731	1,244	5,2/#9
	-4,5	0	0	6,3/#9

3.3 Segunda fase: Diseño final

Se ha determinado un modelo factible y que cumple con las características de un habitáculo seguro. Pero esta estructura en sí es poco práctica, ya que carece de accesos o pasajes para comunicar futuros módulos.

La idea de este proyecto es la posibilidad de construir estructuras que sean modulares para poder ampliarlas tanto como sea necesario. Por eso se procede a incluir en el domo un pasaje que comunique con el exterior y otro destinado a comunicar varios domos consecutivamente a modo de pasillos.

3.3.1 Truncado

El primer paso es decidir la forma de esos pasillos y por donde truncar el domo geodésico. En este caso se respetará en la medida de lo posible la forma del domo procurando no cortar ninguna barra, sino eliminándolas y construyendo a partir de los vértices. Las nuevas partes serán extensiones en la dirección del eje X, a partir de ciertos vértices.

Considerando que estas nuevas estructuras deben tener una altura y una anchura suficientes, se trunca el domo de la siguiente manera.

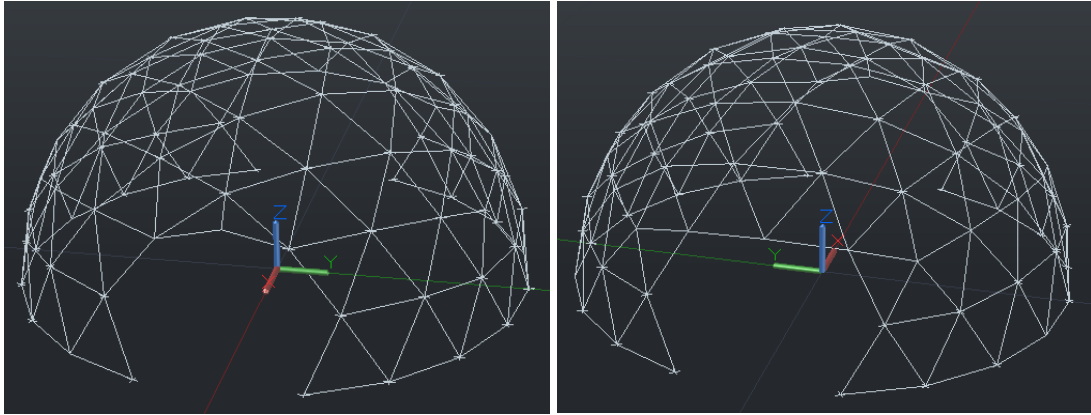


Figura 27. Truncado del domo

La única partición de una barra que se ha hecho ha sido en el primer pasillo (imagen de la izquierda) con el objetivo de mantener una altura parecida en ambos quedando **2.49m** y **2.37m** respectivamente.

Para el acceso al exterior se asignará el pasillo 1 (figura 24, izquierda) por tener una altura algo mayor y una forma más circular, ya que será una parte sometida a continuas presurizaciones y despresurizaciones y por donde se introducirían todo el equipamiento necesario para las misiones. Ambas particiones tienen una anchura similar, alrededor de los 4m. Así pues, el pasillo entre módulos se utilizaría el pasillo 2 (figura 24, derecha).

3.3.2 Diseño de pasillos

Sólo queda diseñar la forma de los pasillos, que se harán también respetando las formas del domo. Serán con barras de longitud similar y conservando la forma triangular con el objetivo de que la estructura al completo se mantenga como una estructura isostática.

La estructura de los pasillos que se ha diseñado para cada función resulta de la siguiente forma.

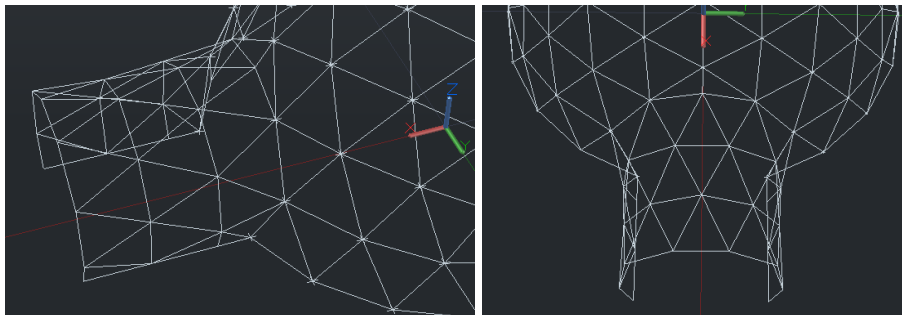


Figura 28. Diseño del pasillo1

Para el pasillo 1 la terminación es plana, para la instalación de futuras puertas. Y tiene una longitud de **2,9 m**.

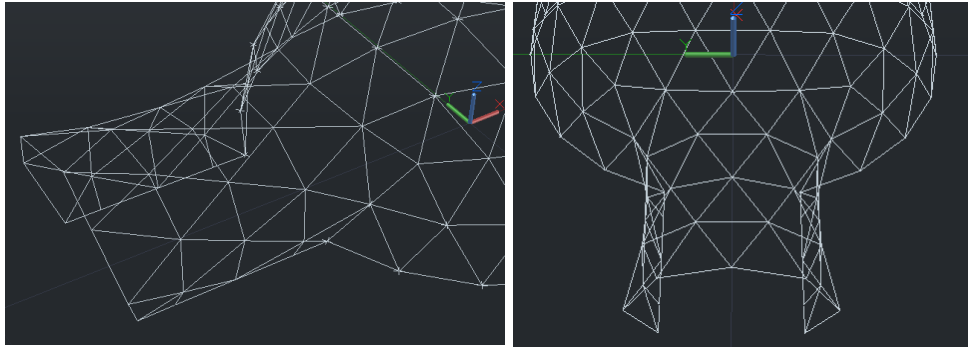


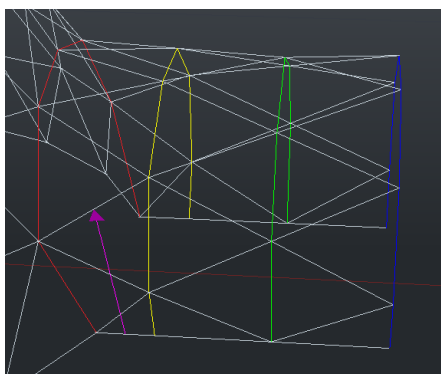
Figura 29. Diseño del pasillo 2

En el pasillo 2 la forma en la que termina es exactamente simétrica a la forma con la que parte del domo. Este pasillo es simétrico con respecto al plano que contiene el arco intermedio de los tres que se pueden divisar en la imagen. Esto se ha hecho teniendo en cuenta que este pasillo iría incluido entre dos domos, por lo que los puntos de un lado y otro de la estructura tienen que coincidir con los del domo.

3.3.3 Asignación de puntos y barras

En este caso los pasillos no siguen una estructura geométrica determinada como el domo. Para probar el diseño y las cargas que se aplicarían se sigue la misma metodología que en el capítulo anterior con el domo.

Primero se averigua la longitud de las barras resultantes y se sigue un patrón para guiarse a través de las estructuras. La longitud, al haber hecho el manualmente el diseño en AutoCAD, se puede ir comprobando una a una. Y para guiarse se numerará a los aros paralelos desde la estructura principal hacia fuera y a cada una de las barras de abajo a arriba y de izquierda a derecha tal y como se muestra en la imagen.



Aro #0
Aro #1
Aro #2
Aro #3

Figura 30. Guía para nombrar cada barra

En magenta se muestra la dirección en la que se recorrerá cada tramo nombrando las barras. Con este sistema, para el pasillo 1, se obtienen las siguientes longitudes:

Tabla 9. Longitudes (m) de las barras del pasillo 1

Barras	Aro #0 (m)	Entre#0/#1 (m)	Aro #1 (m)	Entre#1/#2 (m)	Aro #2 (m)	Entre#2/#3 (m)	Aro #3 (m)
1	1,41	0,6	0,67	1,16	1,2	1,16	0,67
2	1,33	0,9	1,14	1,35	1	1,35	1,14
3	1,1	1,2	1,14	1,29	1,1	1,29	1,14
4	1,1	1,2	1,1	1,29	1,1	1,29	1,1
5	1,33	1,3	1,14	1,29	1	1,29	1,14
6	1,41	1,25	1,14	1,29	1,2	1,29	1,14
7		1,28	0,67	1,29		1,29	0,67
8		1,28		1,29		1,29	
9		1,25		1,29		1,29	
10		1,3		1,29		1,29	
11		1,2		1,29		1,29	
12		1,2		1,29		1,29	
13		0,9		1,35		1,35	
14		0,6		1,16		1,16	

El Aro#0 coincide con las barras del domo por lo que ya conocemos las longitudes. Para los demás se observa que solo hay entre tres y cuatro valores diferentes debido a la simetría del pasillo con respecto al eje XZ, tanto para los arcos como para las barras intermedias. Además, los Aros #1 y #3 son iguales.

Del mismo modo se construye otra tabla para las barras del pasillo 2:

Tabla 10. Longitudes (m) de las barras del pasillo 2

Barras	Aro #0 (m)	Entre#0/#1 (m)	Aro #1 (m)	Entre#1/#2 (m)	Aro #2 (m)	Entre#2/#3 (m)	Aro #3 (m)
1	1,34	0,71	0,64	1,16	1,16	1,16	0,64
2	1,33	0,95	1,13	1,33	1	1,33	1,13
3	1,34	1,28	1,17	1,29	1,2	1,29	1,17
4	1,34	1,29	1,33	1,3	1,2	1,3	1,33

5	1,33	1,47	1,17	1,3	1	1,3	1,17
6	1,34	1,49	1,13	1,3	1,16	1,3	1,13
7		1,33	0,64	1,34		1,34	0,64
8		1,33		1,34		1,34	
9		1,49		1,3		1,3	
10		1,47		1,3		1,3	
11		1,29		1,3		1,3	
12		1,28		1,29		1,29	
13		0,95		1,33		1,33	
14		0,71		1,16		1,16	

En este caso también se ve la simetría entre el mismo plano y entre el Aro#1 y el Aro#3. Habría que añadir un cuarto aro (Aro#4) y una columna “entre #3/#4” pero resultaría ser exactamente igual que las dos primeras que aquí se muestran.

3.4 Recuento de barras y volumen de material

Para aclarar la cantidad de barras que se necesitan para la fase final y cuanto volumen de material habría que recolectar, se ha realizado la siguiente tabla:

Tabla 11. Recuento de barras y volumen (m³) de basalto a extraer

Área (m²)	Zona	Long. de barra (m)	Vol. Barra (m³)	Número	Vol. Total (m³)	Masa total (kg)
Sección 1 0,0352 m²	Pas1: Aro#1 y #3	0,67	0,024	4	0,094	268,75
		1,14	0,040	8	0,321	914,55
		1,1	0,039	2	0,077	220,62
	Pas1: Aro#2	1,2	0,042	2	0,084	240,67
		1,1	0,039	2	0,077	220,62
		1	0,035	2	0,070	200,56
	Pas2: Aro#1 y #3	0,64	0,023	4	0,090	256,72
		1,13	0,040	4	0,159	453,26
		1,17	0,041	4	0,165	469,31
	Pas2: Aro#2	1,16	0,041	2	0,082	232,65
		1	0,035	2	0,070	200,56
		1,2	0,042	2	0,084	240,67
	Domo					
	A	1,139	0,040	16	0,641	1828,03

	B	1,329	0,047	17	0,795	2264,92
	C	1,344	0,047	20	0,946	2694,81
	D	1,325	0,047	30	1,399	3987,29
	E	1,408	0,050	41	2,031	5788,57
	F	1,462	0,051	18	0,926	2639,21
Sección 2 0,0226 m²	Pas2: entre#0/#1	0,71	0,016	4	0,064	183,08
		0,95	0,021	4	0,086	244,97
		1,28	0,029	4	0,116	330,06
		1,29	0,029	4	0,117	332,64
		1,47	0,033	4	0,133	379,06
		1,49	0,034	4	0,135	384,21
		1,33	0,030	4	0,120	342,96
	Pas2: entre#1/#2	1,16	0,026	4	0,105	299,12
		1,33	0,030	4	0,120	342,96
		1,29	0,029	4	0,117	332,64
		1,3	0,029	12	0,353	1005,66
		1,34	0,030	4	0,121	345,53
	Domo					
	A	1,139	0,026	7	0,180	514,13
	1/2A	0,570	0,013	1	0,013	36,72
	B	1,329	0,030	6	0,180	513,89
	C	1,344	0,030	6	0,182	519,71
	D	1,325	0,030	12	0,360	1025,30
	E	1,408	0,032	14	0,446	1270,66
	F	1,462	0,033	6	0,198	565,54
Sección 3 0,0050 m²	Pas1: entre#0/#1	0,6	0,003	2	0,006	17,19
		0,9	0,005	2	0,009	25,79
		1,2	0,006	4	0,024	68,76
		1,3	0,007	2	0,013	37,25
		1,25	0,006	2	0,013	35,81
		1,28	0,006	2	0,013	36,67
	Pas1: entre#1/#2	1,16	0,006	4	0,023	66,47
		1,35	0,007	4	0,027	77,36
		1,29	0,006	20	0,130	369,60
Sección 4 0,0481 m²	Domo					
	A	1,139	0,055	4	0,219	624,30
	B	1,329	0,064	2	0,128	364,00
	D	1,325	0,064	10	0,637	1815,64
	E	1,408	0,068	6	0,406	1157,21
		1,1	0,053	2	0,106	301,38
Sección 5 0,0587 m²	Domo					
	B	1,329	0,007	2	0,013	38,07
	C	1,344	0,007	4	0,027	76,99

	D	1,325	0,007	2	0,013	37,97
	E	1,408	0,007	2	0,014	40,34
	F	1,462	0,007	2	0,015	41,89
	Pas2: Aro#1 y #3	1,33	0,007	2	0,013	38,11
Suma				368	13,109	37361,42

Resultan unas **368 barras** en el conjunto domo pasillo para lo que se tendrían que extraer **13,12 metros cúbicos** de roca basáltica o expresado en masa unos **37361,42 kilogramos**.

Al hacer el pasillo 2 se presupone que se construirá otro domo contiguo para lo que habrá que obtener más material, añadiendo otras **250 barras**, que tiene un domo completo, con las secciones que se muestran en la *Tabla 11*.

A esto habrá que añadir el material de las placas colocadas en forma de triángulos, que se muestra a continuación:

Tabla 12. Recuento y volumen (m³) de material para las placas

Triángulos	Área (m²)	Volumen (m³)	Número	Vol.Total (m³)	Masa Total (kg)
Pas1: entre#0/#1					
1	0,201	0,008	1	0,008	22,91
2	0,536	0,021	1	0,021	61,09
3	0,602	0,024	1	0,024	68,62
4	0,700	0,028	1	0,028	79,84
5	0,649	0,026	1	0,026	74,04
6	0,626	0,025	1	0,025	71,40
7	0,636	0,025	1	0,025	72,47
8	0,626	0,025	1	0,025	71,40
9	0,649	0,026	1	0,026	74,04
10	0,700	0,028	1	0,028	79,84
11	0,602	0,024	1	0,024	68,62
12	0,536	0,021	1	0,021	61,09
13	0,201	0,008	1	0,008	22,91
Pas1: entre#1/#2					
1	0,389	0,016	2	0,031	88,59
2	0,705	0,028	2	0,056	160,64
3	0,660	0,026	2	0,053	150,39
4	0,595	0,024	2	0,048	135,56
5	0,660	0,026	2	0,053	150,39
6	0,642	0,026	2	0,051	146,33
7	0,642	0,026	2	0,051	146,33
8	0,642	0,026	2	0,051	146,33
9	0,660	0,026	2	0,053	150,39
10	0,595	0,024	2	0,048	135,56
11	0,660	0,026	2	0,053	150,39
12	0,705	0,028	2	0,056	160,64

13	0,389	0,016	2	0,031	88,59
Pas2: entre#0/#1					
1	0,227	0,009	2	0,018	51,80
2	0,579	0,023	2	0,046	131,95
3	0,652	0,026	2	0,052	148,67
4	0,797	0,032	2	0,064	181,65
5	0,795	0,032	2	0,064	181,30
6	0,825	0,033	2	0,066	188,17
7	0,766	0,031	2	0,061	174,64
8	0,825	0,033	2	0,066	188,17
9	0,795	0,032	2	0,064	181,30
10	0,797	0,032	2	0,064	181,65
11	0,652	0,026	2	0,052	148,67
12	0,579	0,023	2	0,046	131,95
13	0,227	0,009	2	0,018	51,80
Pas2: entre#1/#2					
	0,371	0,015	2	0,030	84,63
	0,681	0,027	2	0,054	155,24
	0,658	0,026	2	0,053	150,10
	0,600	0,024	2	0,048	136,80
	0,679	0,027	2	0,054	154,85
	0,705	0,028	2	0,056	160,75
	0,774	0,031	2	0,062	176,39
	0,705	0,028	2	0,056	160,75
	0,679	0,027	2	0,054	154,85
	0,600	0,024	2	0,048	136,80
	0,658	0,026	2	0,053	150,10
	0,681	0,027	2	0,054	155,24
	0,371	0,015	2	0,030	84,63
Domo completo					
AAB	0,615	0,025	30	0,738	2102,92
BDD	0,762	0,030	30	0,914	2605,61
CDE	0,798	0,032	60	1,915	5458,60
EEF	0,880	0,035	30	1,056	3008,37
FFF	0,926	0,037	10	0,370	1055,32
TOTAL			251	7,253	20672,07

Para el diseño del domo y los dos pasillos habrá que añadir otros **7,253 m³ o 20672 kg** de basalto. De la misma forma si se acoplara el segundo domo habría que añadir las placas correspondientes al domo de la *Tabla 12*.

Una idea aproximada de cómo quedaría la configuración más básica de la base se muestra en la siguiente imagen.

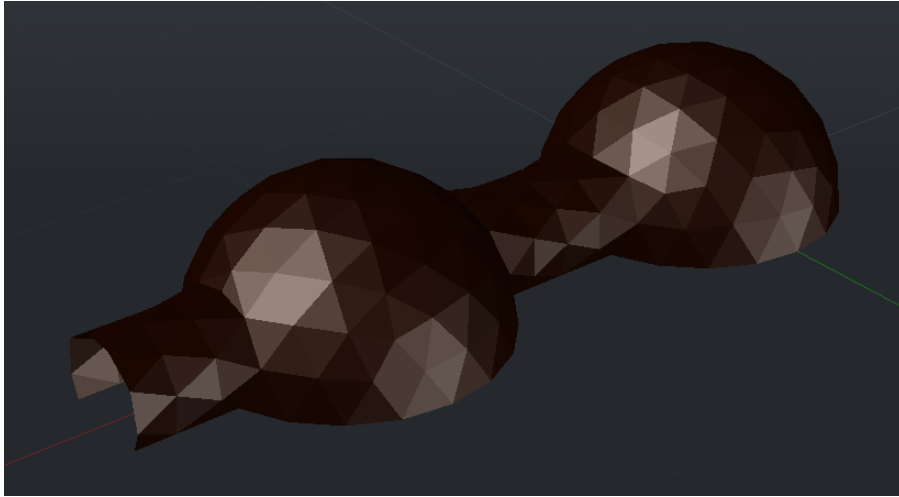


Figura 31. Configuración básica de los módulos

Haciendo el recuento de barras y placas, para una estructura básica como esta, harían falta unos **32,23 m³** o en términos de masa unos **100411 kg** de material basáltico.

MÉTODO DE CÁLCULO

4.1 Introducción

Una vez se tiene la posición de cada punto en el espacio y las longitudes de las barras, ya se está listo para construir nuestro domo sobre el terreno.

El objetivo ahora es obtener las cargas que la estructura sufrirá en la superficie marciana. Como se comentaba en el capítulo primero, esta estructura necesitará ser presurizada debido a la casi inexistente e irrespirable atmósfera marciana. Esto someterá el sistema a unas cargas repartidas por la superficie interior del domo.

Además de esas cargas de presión, hay que tener en cuenta el propio peso de la estructura y el peso de las placas que se colocarían entre las barras.

Como la disposición espacial de cada elemento ya ha sido determinada, solo queda decidir qué tamaño y tipo de sección deben de tener todas o parte de las barras.

Todo ello con un coeficiente de seguridad suficiente para que nuestra configuración sea fiable y resistente a cualquier condición meteorológica o posibles impactos de pequeñas rocas.

Debido a que los paneles se construirían a modo de envoltorio por fuera de la estructura, las partes que estarán en contacto con la malla interior de presurización serán solamente las barras.

Todo el análisis de las cargas será realizado con el software de cálculo por elementos finitos ABAQUS. Y el dibujo tridimensional de la estructura se hará con el software AutoCAD, uniendo con líneas (elemento unidimensional) cada uno de los puntos calculados previamente, quedando de la siguiente manera:

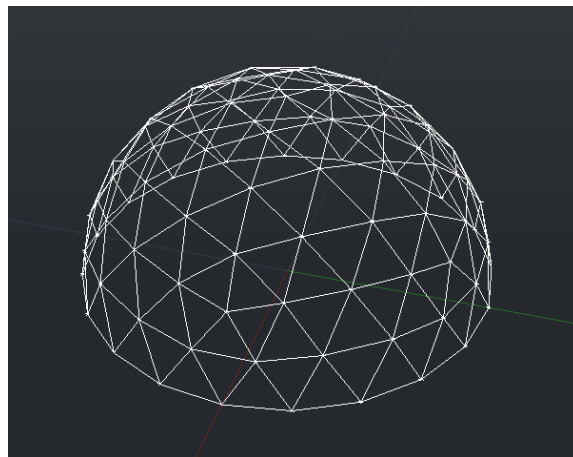


Figura 32. Diseño del Domo Geodésico en AutoCAD

Se exporta la imagen y la y se importa en ABAQUS. Sujetos a algunas restricciones del software ABAQUS, no nos es posible aplicar las cargas distribuidas en elementos unidimensionales, así que se calculan las fuerzas equivalentes en cada uno de los puntos.

4.2 Cálculo de cargas

4.2.1 Peso propio

Primero se empieza por calcular el peso de la estructura en sí, que ira en función del tamaño de la sección. La gravedad en Marte es un **37.9%** la de la Tierra así que el peso no será tan relevante como cabría esperar.

Como la magnitud de esas fuerzas está ligada a la sección, se calcularán mediante software por elementos finitos aplicando una aceleración de **3.71m/s²**. Por lo que no podemos conocer aún los valores exactos.

4.2.2 Fase inicial

4.2.2.1 Presurización

Por otro lado, las cargas que más relevancia tienen para la estructura, es la presurización de la misma. El valor de la presión que se ejercería sería la diferencia entre la presión (**Pa**) terrestre a nivel del mar en la Tierra y la presión en la superficie de Marte, es decir:

$$P_{int} = 101325 \text{ Pa} - 636 \text{ Pa} = 100689 \text{ Pa} \quad (6)$$

Este valor es el que se toma para poder obtener valores de cargas concretos, pero podría variar dentro de unos márgenes razonables y soportables para los astronautas. Para poder obtener la fuerza puntual (**N**) se tendrá que multiplicar por los **m²** de superficie donde se aplica.

$$F_{presión} = \text{Área}_{triangulo} * P_{int} \quad (7)$$

Esto plantea un inconveniente, la superficie está dividida por triángulos formados a su vez por barras que varían en longitud, variando por tanto la superficie de cada uno.

En la estructura se encuentran 5 tipos de triángulos que se repiten sistemáticamente, a saber:

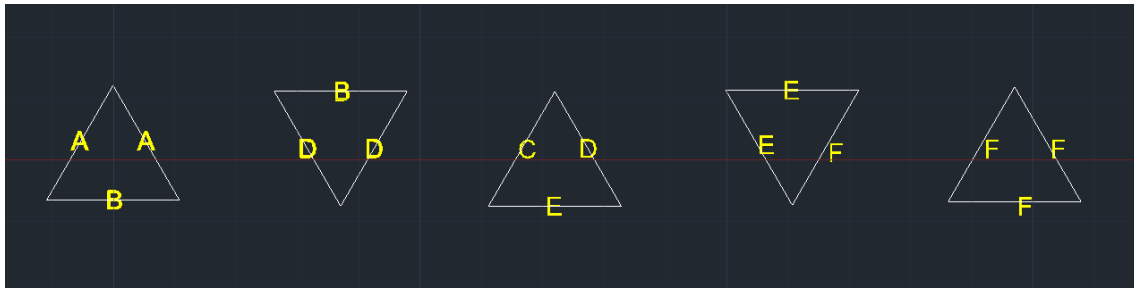


Figura 33. Tipos de triángulos

Para averiguar el área de cada uno de ellos se recurre a la fórmula de *Herón*, que permite conocer dicha área conociendo solamente la longitud de cada lado. Las ecuaciones para un triángulo de lados a , b y c , son:

$$\text{Área}_{\text{triángulo}} = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)} \quad (8)$$

Siendo s el semiperímetro (m):

$$s = \frac{a+b+c}{2} \quad (9)$$

Sustituyendo para cada uno de los triángulos, las correspondientes fuerzas puntuales son:

Tabla 13. Área (m^2) de los triángulos principales y fuerza de presurización (N)

Triángulos	Área (m^2)	s	F. punt. (N)
AAB	0,615	1,804	61913
BDD	0,762	1,99	76713
CDE	0,798	2,038	80354
EEF	0,88	2,139	88570
FFF	0,926	2,193	93209

Esas cargas puntuales corresponderían a una fuerza aplicada en el centro geométrico de cada triángulo. Como aquí se aplicarán las cargas en cada uno de los puntos, esas fuerzas se reparten entre los tres vértices de cada uno.

Tabla 14. Fuerza (N) de presurización por cada triángulo que rodea al vértice

Triángulos	F/3 (N)
AAB	20638
BDD	25571
CDE	26785
EEF	29523
FFF	31070

Ahora bien, cada punto es vértice de varios triángulos a la vez, lo que lleva a tener que sumar un tercio de todas las fuerzas puntuales de todos los triángulos que confluyen en cada punto.

Pero una vez más la simetría hace esta tarea más sencilla. En el domo se distinguen solamente 4 tipos de puntos que se rodean de los mismos triángulos. Como se puede comprobar en la imagen, la distribución de triángulos se repite:

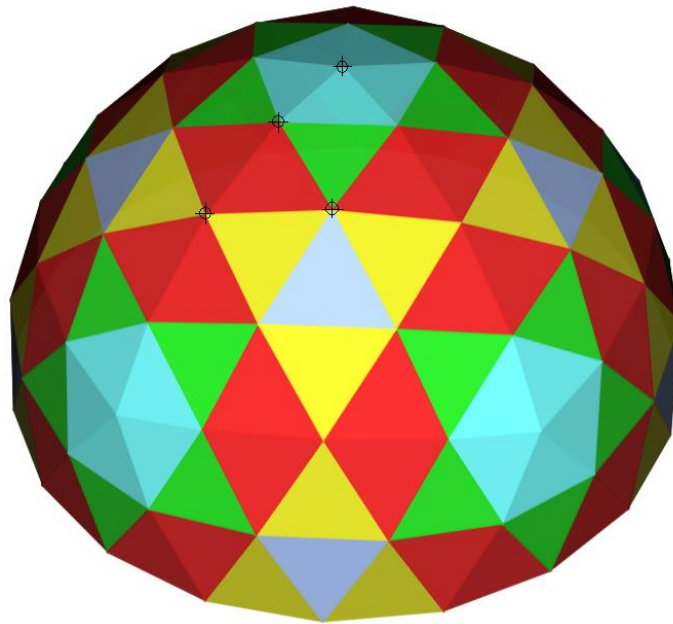


Figura 34. Mapa de la distribución del tipo de triángulos [41]

Los puntos 0.0, 1.0, 2.0, 2.1 son los que marcan el patrón que se sigue en el resto de la figura según los ejes de simetría.

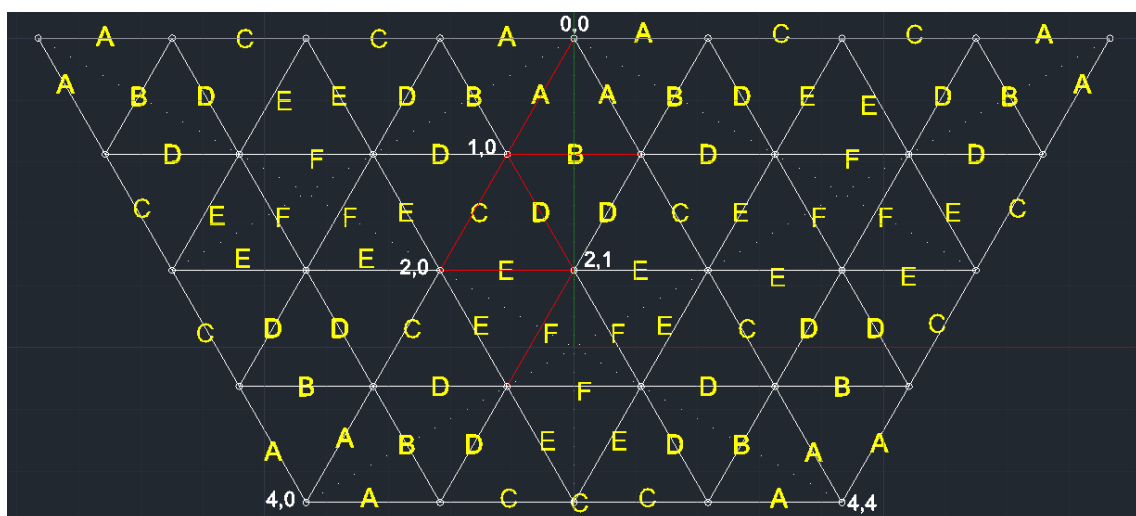


Figura 35. Generación de los triángulos adyacentes al principal

Así pues, se distinguen 4 tipos de polígonos formados por los triángulos que rodean a estos puntos: 1 pentágono (0.0) correspondiente a cada vértice principal del icosaedro y 3 hexágonos (1.0, 2.0, 2.1) correspondiente a cada uno de los puntos proyectado sobre la esfera.

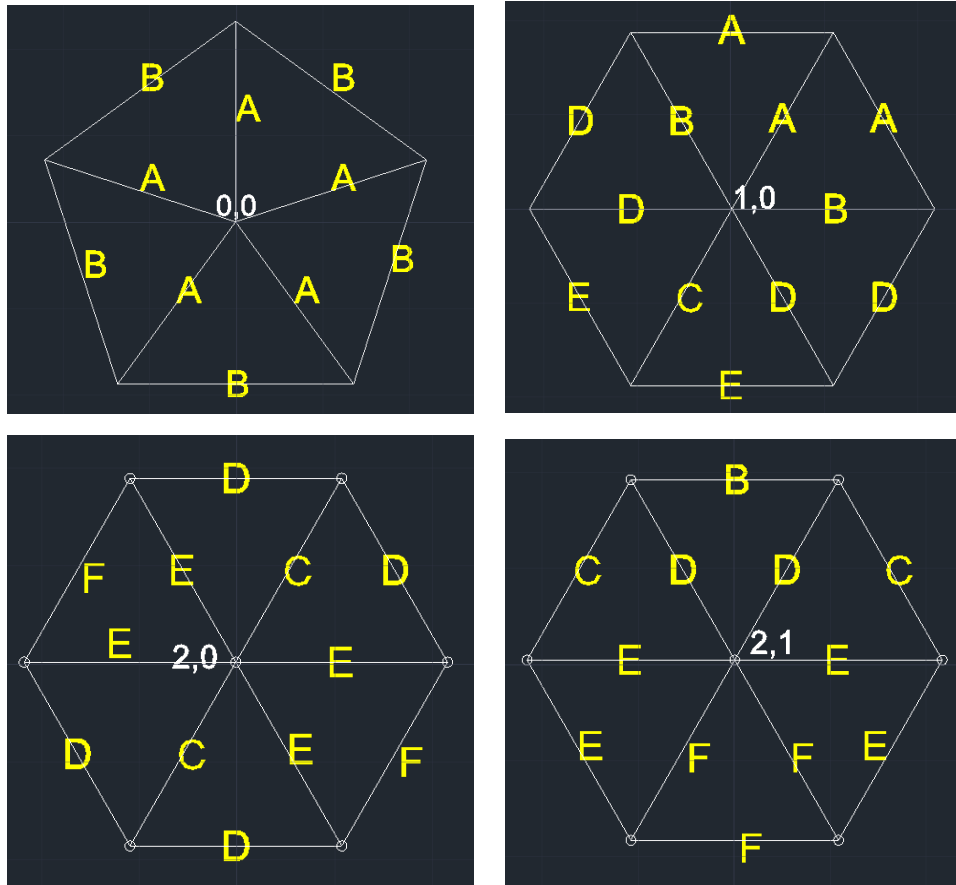


Figura 36. Familia de polígonos formados alrededor de los vértices principales

Por último, solo queda sumar 1/3 de la fuerza puntual de cada tipo de triángulo que rodea a estos puntos, quedando así:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Vértice } 0,0 \longrightarrow 5 * F_{AAB}/3 & \text{Vértice } 1,0 \left\{ \begin{array}{l} 2 * F_{AAB}/3 \\ 2 * F_{BDD}/3 \\ 2 * F_{CDE}/3 \end{array} \right. \\
 \text{Vértice } 2,0 \left\{ \begin{array}{l} 4 * F_{CDE}/3 \\ 2 * F_{EEF}/3 \end{array} \right. & \text{Vértice } 2,1 \left\{ \begin{array}{l} 1 * F_{BDD}/3 \\ 2 * F_{CDE}/3 \\ 2 * F_{EEF}/3 \\ 1 * F_{FFF}/3 \end{array} \right.
 \end{array}$$

Para los vértices principales del triángulo de simetría:

Tabla 15. Fuerza puntual (N) en los vértices principales

Vértices	F Presión (N)
0,0/	103188
1,0/	145986
1,1/	145986
2,0/	166185
2,1/	169257
3,1/	169257

Y como se comprueba, al haber 4 distribuciones de triángulos distintas, solo hay 4 fuerzas distintas. Las cuáles se repetirán a lo largo de la estructura según los puntos.

4.2.2.2 Peso de placas

Otras fuerzas que tienen gran importancia son las que se ejercerían por el peso de las placas colocadas sobre la estructura con la forma de cada uno de los triángulos.

Estas se colocarían una vez la estructura base estuviera completa y sus dimensiones en este caso serían de unos **4 cm** de grosor, con la posibilidad de aumentarlo si es necesario en un futuro.

Las placas tienen la misma área que los triángulos que forman las barras (obviando los laterales) independientemente de la sección que se escoja, ya que irían colocadas sobre las barras envolviendo la estructura. Aquí se muestra un ejemplo de cómo irían dispuestas, empezando por placas de los triángulos principales.

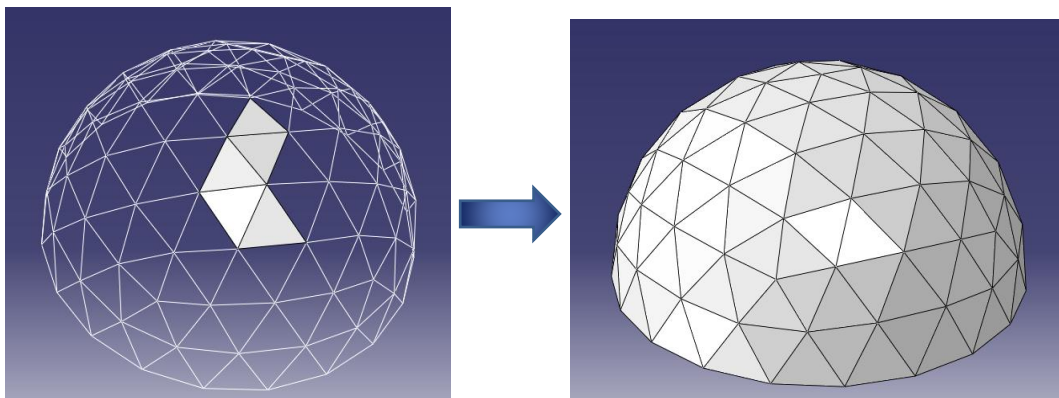


Figura 37. Colocación de las placas

Con las áreas de cada uno de los triángulos que se han calculado anteriormente, se multiplica por el grosor obteniendo así el volumen de cada placa. Y posteriormente para conocer el peso se multiplica el volumen por la densidad de nuestro material (basalto) y por la aceleración de la gravedad.

$$Peso_{placa} = V_{placa} * 2850 \frac{kg}{m^3} * 3.71 m/s^2 \quad (10)$$

Tabla 16. Peso (N) de las placas

Placas	Volumen (m ³)	Peso (N)	Peso/3 (N)
AAB	0,025	260	87
BDD	0,031	322	107
CDE	0,032	338	113
EEF	0,035	372	124
FFF	0,037	392	131

Siguiendo la misma lógica que para el caso de la presurización, la fuerza que ejercería el peso en el centro de masas de la placa se reparte entre los tres vértices del triángulo correspondiente dividiéndola entre 3.

Por tanto, para los vértices principales del triángulo de simetría, quedan:

Tabla 17. Peso (N) correspondiente a cada vértice principal

Vértices	F _{Peso} (N)
0,0/	433
1,0/	613
1,1/	613
2,0/	698
2,1/	711
3,1/	711

Por último, también hay que tener muy en cuenta las tensiones producidas por las variaciones de temperatura, que en Marte son mucho mayores que en la Tierra. Estas variaciones son del orden de $\Delta T=60^\circ C$.

El coeficiente de dilatación (Alpha) mide la relación entre el cambio de la longitud predominante con respecto a los cambios de temperatura. De modo que a mayor coeficiente mayor variación de longitud (**m**) y mayores tensiones se producen.

$$\Delta L = \alpha * \Delta T \quad (11)$$

Para el material empleado, este coeficiente es bastante bajo ($\alpha = 5.4E-6$), lo cual es una gran ventaja.

4.2.3 Fase final

Ahora siguiendo con la metodología, se deben determinar las fuerzas que se van a generar por la presurización, y las placas en el diseño final. En esta ocasión como no hay patrones de triángulos que se repitan en los pasillos, calcularemos su área uno a uno y las fuerzas correspondientes a cada punto.

Las magnitudes de las fuerzas correspondientes a la parte central (domo) se mantendrán tal y como se han calculado en el apartado anterior, ya que en esa parte la geometría no ha cambiado.

4.2.3.1 Presurización y Peso de placas

Se hallan las áreas de cada triángulo con la misma fórmula de Herón, calculando previamente el semiperímetro *s*. Después se multiplica por el grosor de las placas establecido (**0.04m**) para el volumen y después por la gravedad y la densidad para obtener el peso. Y finalmente para las fuerzas de presurización se multiplica el área por la presión. Se obtienen directamente las fuerzas divididas por tres para sumar seguidamente según el número de triángulos que rodeen a los puntos.

Tabla 18. Área (m^2) y Volumen (m^3) de los triángulos del pasillo 1

Pas. 1		Entre #0/#1		Entre #1/#2			Entre #2/#3		
Nº Tri	s (m)	Área (m^2)	Vol. (m^3)	s (m)	Área (m^2)	Vol. (m^3)	s (m)	Área (m^2)	Vol. (m^3)
1	1,085	0,201	0,008	1,590	0,389	0,016	1,590	0,389	0,016
2	1,754	0,536	0,021	1,920	0,705	0,028	1,920	0,705	0,028
3	1,770	0,602	0,024	1,860	0,660	0,026	1,860	0,660	0,026
4	1,913	0,700	0,028	1,790	0,595	0,024	1,790	0,595	0,024
5	1,845	0,649	0,026	1,860	0,660	0,026	1,860	0,660	0,026
6	1,815	0,626	0,025	1,840	0,642	0,026	1,840	0,642	0,026
7	1,830	0,636	0,025	1,840	0,642	0,026	1,840	0,642	0,026
8	1,815	0,626	0,025	1,840	0,642	0,026	1,840	0,642	0,026

9	1,845	0,649	0,026	1,860	0,660	0,026	1,860	0,660	0,026
10	1,913	0,700	0,028	1,790	0,595	0,024	1,790	0,595	0,024
11	1,770	0,602	0,024	1,860	0,660	0,026	1,860	0,660	0,026
12	1,754	0,536	0,021	1,920	0,705	0,028	1,920	0,705	0,028
13	1,085	0,201	0,008	1,590	0,389	0,016	1,590	0,389	0,016

Tabla 19. Fuerzas (N) de presurización y peso del pasillo 1

Pas 1	Entre #0/#1		Entre #1/#2		Entre #2/#3	
N° Tri	Peso/3 (N)	F_{Pres}/3 (N)	Peso/3 (N)	F_{Pres}/3 (N)	Peso/3 (N)	F_{Pres}/3 (N)
1	28,3	6746	54,8	13040	54,8	13040
2	75,5	17984	99,3	23648	99,3	23648
3	84,9	20202	93,0	22139	93,0	22139
4	98,7	23507	83,8	19956	83,8	19956
5	91,6	21798	93,0	22139	93,0	22139
6	88,3	21021	90,5	21540	90,5	21540
7	89,6	21336	90,5	21540	90,5	21540
8	88,3	21021	90,5	21540	90,5	21540
9	91,6	21798	93,0	22139	93,0	22139
10	98,7	23507	83,8	19956	83,8	19956
11	84,9	20202	93,0	22139	93,0	22139
12	75,5	17984	99,3	23648	99,3	23648
13	28,3	6746	54,8	13040	54,8	13040

Y ahora según los triángulos adyacentes a cada punto sumamos cada uno de los valores que correspondan. Por ejemplo, para el primer punto del Aro#0 se deben sumar las fuerzas de los triángulos CDE, EEF dos veces, FFF, y también 2,3 y 4 que están entre los aros #0 y #1. Los puntos pertenecientes a este aro acumulan más cargas que los demás, lo que será muy importante a tener en cuenta de cara a diseñar las secciones posteriormente. Para los puntos de los demás aros son 6 triángulos que los rodean, excepto por el último que solo son tres. Obteniendo los siguientes valores:

Tabla 20. Sumatorio de las fuerzas (N) que actúan en cada vértice, *Pasillo 1*

Pasillo 1

Presión (N)	Aro/Nodos	#1	#2	#3	#4	#5	#6
	#0	178594	155784	84015	155784	178594	
	#1	103759	129740	129374	129374	129740	103759
	#2	131485	127270	129241	127270	131485	
	#3	58827	64234	65219	65219	64234	58827

Peso (N)	#0	#1	#2	#3	#4	#5	#6
	#0	750	654	353	654	750	
	#1	436	545	543	543	545	436
	#2	552	535	543	535	552	
	#3	247	270	274	274	270	247

Ahora para el Pasillo 2 se calculan las fuerzas correspondientes con el mismo procedimiento.

Tabla 21. Área (m^2) y Volumen (m^3) de los triángulos del *pasillo 2*

Pas 2		Entre #0/#1		Entre #1/#2			Entre #2/#3		
N°Tri	s (m)	Área (m^2)	Vol. (m^3)	s (m)	Área (m^2)	Vol. (m^3)	s (m)	Área (m^2)	Vol. (m^3)
1	1,150	0,227	0,009	1,565	0,371	0,015	1,565	0,371	0,015
2	1,785	0,579	0,023	1,890	0,681	0,027	1,890	0,681	0,027
3	1,850	0,652	0,026	1,860	0,658	0,026	1,860	0,658	0,026
4	2,045	0,797	0,032	1,800	0,600	0,024	1,800	0,600	0,024
5	2,065	0,795	0,032	1,885	0,679	0,027	1,885	0,679	0,027
6	2,080	0,825	0,033	1,920	0,705	0,028	1,920	0,705	0,028
7	1,995	0,766	0,031	2,005	0,774	0,031	2,005	0,774	0,031
8	2,080	0,825	0,033	1,920	0,705	0,028	1,920	0,705	0,028
9	2,065	0,795	0,032	1,885	0,679	0,027	1,885	0,679	0,027
10	2,045	0,797	0,032	1,800	0,600	0,024	1,800	0,600	0,024
11	1,850	0,652	0,026	1,860	0,658	0,026	1,860	0,658	0,026
12	1,785	0,579	0,023	1,890	0,681	0,027	1,890	0,681	0,027
13	1,150	0,227	0,009	1,565	0,371	0,015	1,565	0,371	0,015

Tabla 22. Fuerzas de presurización (N) y peso (N) del pasillo 2

Pas 2	Entre #0/#1		Entre #1/#2		Entre #2/#3	
N°Tri	Peso/3 (N)	F _{Pres} /3 (N)	Peso/3 (N)	F _{Pres} /3 (N)	Peso/3 (N)	F _{Pres} /3 (N)
1	32,0	7625	52,3	12458	52,3	12458
2	81,6	19424	96,0	22852	96,0	22852
3	91,9	21885	92,8	22096	92,8	22096
4	112,3	26740	84,6	20138	84,6	20138
5	112,1	26689	95,7	22794	95,7	22794
6	116,3	27699	99,4	23664	99,4	23664
7	108,0	25708	109,1	25965	109,1	25965
8	116,3	27699	99,4	23664	99,4	23664
9	112,1	26689	95,7	22794	95,7	22794
10	112,3	26740	84,6	20138	84,6	20138
11	91,9	21885	92,8	22096	92,8	22096
12	81,6	19424	96,0	22852	96,0	22852
13	32,0	7625	52,3	12458	52,3	12458

Las fuerzas resultantes serán entonces:

Tabla 23. Sumatorio de las fuerzas (N) que actúan en cada vértice, Pasillo 2

Pasillo 2							
Presión (N)	Aro/Nodos	#1	#2	#3	#4	#5	#6
	#0	141043	174759	164199	174759	141043	
	#1	106340	140342	152519	152519	140342	106340
	#2	130171	133192	146586	133192	130171	
	#3	106340	140342	152519	152519	140342	106340
Peso (N)							
	#0	592	734	690	734	592	
	#1	447	589	649	649	589	447
	#2	547	559	616	559	547	
	#3	447	589	649	649	589	447

Se puede observar que los valores se repiten de nuevo en el Aro #3, tanto en presión como en peso, debido a la simetría.

4.3 Vectores de Carga y Restricciones

Los valores que se han calculado son solo las magnitudes en valor absoluto. Para poder aplicar adecuadamente esas fuerzas, se debe sumar cada una de ellas vectorialmente.

4.3.1 Condición de contorno

Antes de aplicar cualquier carga, se han de definir las condiciones de contorno. Para nuestra estructura existe una sola restricción y es el anclaje de la base al suelo. Por ello en principio se colocará una restricción tipo “ENCASTRE” que no permite el movimiento en ninguna dirección y tampoco el giro relativo.

Como ya se demostrará más adelante, existen redundancias en esas restricciones por lo que finalmente se impedirán solo las traslaciones en cualquier dirección, pero no el giro, anclando solo los vértices de la base con una restricción tipo “PINNED”.

4.3.2 Fase inicial

4.3.2.1 Pesos

Los vectores de las fuerzas como el peso de la estructura son fáciles de calcular, puesto que, obviamente, todos tienen la misma dirección (0,0,-z). Y está aplicada a todo el modelo. Para ello se introduce una carga de tipo “gravity” en ABAQUS con valor -3.71m/s^2 en el eje Z.

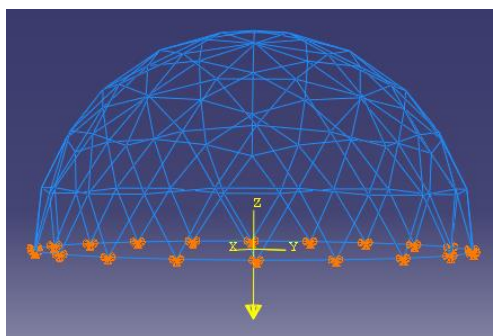


Figura 38. Dirección de la gravedad aplicada

El programa calculará la magnitud del peso en esa dirección según la cantidad de material que implique cada sección.

Otro peso que se ha de asignar es el de las placas, con la diferencia de que este no se aplica a todo el modelo por igual, sino que es diferente según los puntos.

Como ya se ha comprobado, se repiten los valores de ciertos puntos según los triángulos de los que se rodea. Y además todos coinciden en dirección $(0,0,-z)$, lo que permite aplicar la misma carga en varios puntos a la vez.

En primer lugar, se colocará la fuerza **P1** con valor **-433.4 N**, que corresponde al punto 0,0 y por tanto a todos los vértices principales del icosaedro.

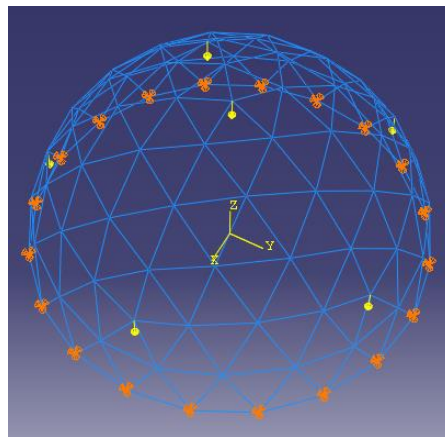


Figura 39. Fuerza P1

En segundo lugar, se coloca la carga **P2** con un valor de **-613.2 N**, que corresponde a los puntos 1.0, 1.1, etc.

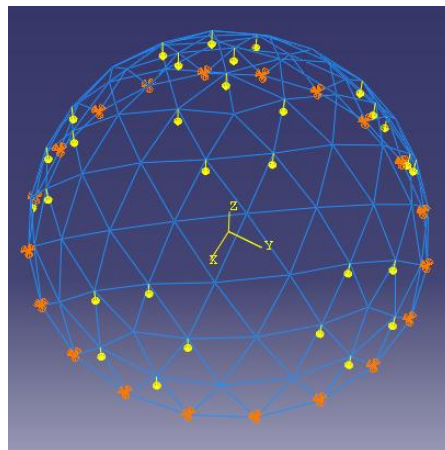


Figura 40. Fuerza P2

Se prosigue con la carga **P3** con un valor de **-698.1 N** que se aplica en los puntos medios de las aristas del icosaedro (2.0, 2.2, etc.).

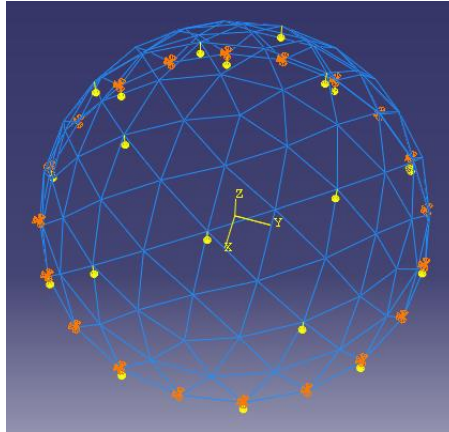


Figura 41. Fuerza P3

Y por último la carga **P4** con valor **-711 N** que se aplica en el resto de puntos (2.1, 3.1, etc.).

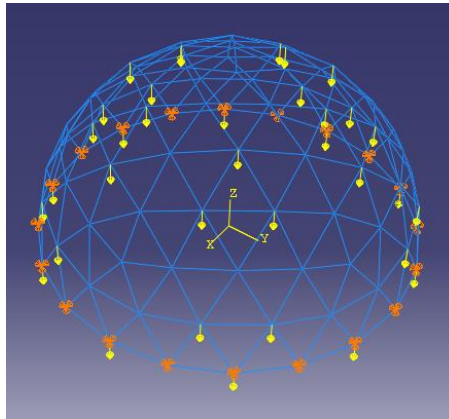


Figura 42. Fuerza P4

4.3.2.2 Presurización

En el caso de las cargas por la presurización del módulo, ya no son tan sencillas de calcular, puesto que cada punto tiene un vector distinto a todos los demás.

La dirección de la fuerza es perpendicular a la superficie del domo. Como las cargas están aplicadas en los vértices y estos están rodeados de varios triángulos con distintas direcciones y no siempre simétricos, no queda clara la dirección. Pero como los vértices son coincidentes con puntos pertenecientes la esfera que rodea el domo, la dirección perpendicular a cada punto resulta ser el vector que une el centro de la esfera y cada uno de los puntos.

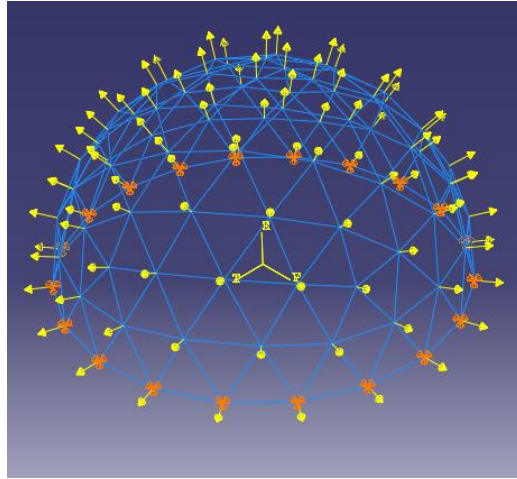


Figura 43. Fuerza de presurización (N)

Debido a una restricción en el software ABAQUS, no se pueden combinar fuerzas en distintos sistemas de referencia (en este caso esférico y cartesiano), así que se han de calcular las coordenadas cartesianas de cada vector, con modulo igual a la magnitud de la fuerza correspondiente a cada punto.

Para resolver esta cuestión se debe calcular el vector unitario del vector de posición de todos los vértices. Se divide cada coordenada de cada punto por el módulo que es igual al radio de la esfera, en nuestro caso $r = 4,5m$. Obteniendo así los siguientes vectores:

Tabla 24. Vectores unitarios de los vértices del domo

	X	Y	Z
Vértices	Vector unitario		
0,0/#1	0	0	1
1,0/#1	0,251	0	0,968
1,1/#1	0,078	0,239	0,968
2,0/#1	0,526	0	0,851
2,1/#1	0,362	0,263	0,894
3,1/#1	0,638	0,263	0,724
2,2/#1	0,162	0,5	0,851
3,0/#1	0,753	0	0,658
3,2/#1	0,447	0,526	0,724
3,3/#1	0,233	0,717	0,658
4,0/#1	0,894	0	0,447
4,1/#1	0,831	0,239	0,502
4,2/#1	0,688	1	0,526
4,3/#1	0,484	0,717	0,502
4,4/#1	0,276	0,851	0,447
5,1/#2	0,957	0,148	0,251
5,2/#2	0,862	0,425	0,276
5,3/#2	0,671	0,688	0,276

5,4/#2	0,436	0,864	0,251
6,2/#2	0,951	0,309	0
6,3/#2	0,809	0,588	0
6,4/#2	0,588	0,809	0
0,0/#3	—	—	—
1,0/#3	—	—	—
1,1/#3	-0,203	0,148	0,968
2,0/#3	—	—	—
2,1/#3	-0,138	0,425	0,894
3,1/#3	-0,053	0,688	0,724
2,2/#3	-0,425	0,309	0,851
3,0/#3	—	—	—
3,2/#3	-0,362	0,588	0,724
3,3/#3	-0,610	0,443	0,658
4,0/#3	—	—	—
4,1/#3	0,030	0,864	0,502
4,2/#3	-0,263	0,809	0,526
4,3/#3	-0,532	0,682	0,502
4,4/#3	-0,724	0,526	0,447
1,0/#4	0,957	-0,148	0,251
1,1/#4	—	—	—
2,1/#4	1	0	0
2,0/#4	0,951	-0,309	0
1,1/#5	0,155	0,955	0,251
2,1/#5	0,309	0,951	0
2,2/#5	0	1	0
5,2/#6	-0,138	0,951	0,276
5,3/#6	-0,447	0,851	0,276
5,4/#6	-0,687	0,682	0,251
6,3/#6	-0,309	0,951	0
6,4/#6	-0,588	0,809	0
1,1/#7	-0,861	0,443	0,251
2,1/#7	-0,809	0,588	0
2,2/#7	-0,951	0,309	0
2,1/#8	-0,447	0	0,894
3,1/#8	-0,671	0,162	0,724
4,1/#8	-0,813	0,295	0,502
4,2/#8	-0,851	0	0,526
5,2/#9	-0,947	0,162	0,276
6,3/#9	-1	0	0

Seguidamente se multiplica cada componente del vector por el valor de la fuerza correspondiente cada punto, que diferirá en magnitud.

Tabla 25. Vectores de carga de cada vértice del domo

Vértices	Vectores de carga (Pa)		
0,0/#1	0	0	103188
1,0/#1	36664	0	141307
1,1/#1	11330	34870	141307
2,0/#1	87369	0	141366
2,1/#1	61238	44492	151388
3,1/#1	108019	44492	122475
2,2/#1	26998	83093	141366
3,0/#1	109992	0	95988
3,2/#1	75694	88983	122475
3,3/#1	33989	104609	95988
4,0/#1	92294	0	46147
4,1/#1	121322	34870	73328
4,2/#1	114367	83093	87369
4,3/#1	70653	104609	73328
4,4/#1	28520	87777	46147
5,1/#2	139654	21551	36664
5,2/#2	145866	71989	46781
5,3/#2	113541	116481	46781
5,4/#2	63651	126159	36664
6,2/#2	158052	51354	0
6,3/#2	136932	99487	0
6,4/#2	97681	134447	0
1,1/#3	-29662	21551	141307
2,1/#3	-23391	71989	151388
3,1/#3	-8934	116481	122475
2,2/#3	-70683	51354	141366
3,2/#3	-61238	99487	122475
3,3/#3	-88986	64652	95988
4,1/#3	4328	126159	73328

4,2/#3	-43684	134447	87369
4,3/#3	-77656	99521	73328
4,4/#3	-74667	54249	46147
1,0/#4	139654	-21551	36664
2,1/#4	169257	0	0
2,0/#4	158052	-51354	0
1,1/#5	22660	139478	36664
2,1/#5	52303	160973	0
2,2/#5	0	166185	0
5,2/#6	-23391	160973	46781
5,3/#6	-75694	143978	46781
5,4/#6	-100315	99521	36664
6,3/#6	-52303	160973	0
6,4/#6	-97681	134447	0
1,1/#7	-125650	64652	36664
2,1/#7	-136932	99487	0
2,2/#7	-158052	51354	0
2,1/#8	-75694	0	151388
3,1/#8	-113541	27497	122475
4,1/#8	-118647	43101	73328
4,2/#8	-141366	0	87369
5,2/#9	-160322	27497	46781
6,3/#9	-169257	0	0

Con los parámetros una vez calculados, solo se tiene que ir colocando cargas puntuales en cada vértice, introduciendo cada coordenada en el sistema cartesiano.

El resultado de combinar cada una de las fuerzas obtenidas es el siguiente:

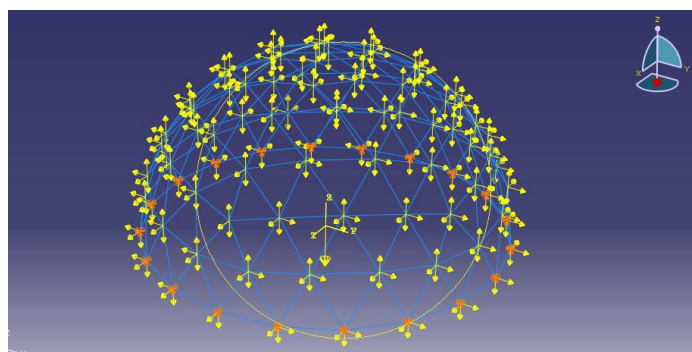


Figura 44. Combinación de todas las cargas aplicadas

4.3.3 Fase final

Al igual que en el cálculo de las fuerzas los vectores para la parte central de la estructura completa no cambian.

4.3.3.1 Pesos y Presurización

Para ambos pasillos de forma similar a la del domo, el vector de posición es útil para obtener el vector unitario y así calcular la dirección de cada fuerza correspondiente a la presión. Pero en este caso con la peculiaridad de que las fuerzas tienen un vector perpendicular a una superficie cilíndrica que envolvería el pasillo.

Esto es igual a decir que son perpendiculares al eje de revolución de dicho cilindro, en este caso el eje X. Para obtener esos vectores solo es necesario anular la coordenada X de cada vector de posición con respecto al eje de coordenadas en el centro del domo. Y después seguir con el procedimiento: obtener el módulo y dividir cada coordenada por el mismo.

Cabe destacar algunos puntos particularmente críticos, y esos son los del Aro#0 de ambos pasillos que están rodeados por siete triángulos, del domo y del pasillo. Los triángulos del domo ejercen la fuerza en la dirección de los vectores calculados anteriormente, perpendiculares a la esfera. Los triángulos del pasillo lo harán en dirección perpendicular al eje X, por lo que el vector resultante en esos puntos será la suma de ambos vectores.

Tabla 26. Vectores unitario y normal de los puntos del *Pasillo 1*

Pasillo 1							
Nodos Aro#0	Vector unitario normal			Vector normal			Módulo
#1	0,65	-0,64	0,42	0,86	-0,85	0,55	1,33
#2	0,60	-0,34	0,72	0,83	-0,48	1	1,39
#3	0,83	0	0,56	0,82	0	0,55	0,99
#4	0,60	0,34	0,72	0,83	0,48	1	1,39
#5	0,65	0,64	0,42	0,86	0,85	0,55	1,33
Nodos Aro#1							
#1	0	-0,95	-0,32	0	-1,65	-0,56	1,74
#2	0	-0,93	0,36	0	-1,49	0,57	1,6
#3	0	-0,41	0,91	0	-0,53	1,19	1,3
#4	0	0,41	0,91	0	0,53	1,19	1,3
#5	0	0,93	0,36	0	1,49	0,57	1,6
#6	0	0,95	-0,32	0	1,65	-0,56	1,74
Nodos Aro#2							
#1	0	-1,00	0	0	-1,57	0	1,57

#2	0	-0,75	0,66	0	-1,01	0,88	1,34
#3	0	0	1	0	0	1,31	1,31
#4	0	0,75	0,66	0	1,01	0,88	1,34
#5	0	1	0	0	1,57	0	1,57

Tabla 27. Vectores unitario y normal de los puntos del Pasillo 2

Pasillo 2							
Nodos Aro#0	Vector unitario normal			Vector normal			Modulo
#1	-0,65	0,66	0,38	-0,86	0,89	0,5	1,33
#2	-0,57	0,42	0,71	-0,81	0,59	1	1,42
#3	-0,63	0	0,78	-0,85	0	1,05	1,35
#4	-0,57	-0,42	0,71	-0,81	-0,59	1	1,42
#5	-0,65	-0,66	0,38	-0,86	-0,89	0,5	1,33
Nodos Aro#1							
#1	0	0,93	-0,36	0	1,6	-0,61	1,71
#2	0	0,95	0,30	0	1,66	0,52	1,74
#3	0	0,5	0,86	0	0,66	1,13	1,31
#4	0	-0,5	0,86	0	-0,66	1,13	1,31
#5	0	-0,95	0,30	0	-1,66	0,52	1,74
#6	0	-0,93	-0,36	0	-1,6	-0,61	1,71
Nodos Aro#2							
#1	0	1	-0,03	0	1,67	-0,05	1,67
#2	0	0,88	0,47	0	1,55	0,82	1,75
#3	0	0	1	0	0	1,13	1,13
#4	0	-0,88	0,47	0	-1,55	0,82	1,75
#5	0	-1	-0,03	0	-1,67	-0,05	1,67
Nodos Aro#3							
#1	0	0,93	-0,36	0	1,6	-0,61	1,71
#2	0	0,95	0,30	0	1,66	0,52	1,74
#3	0	0,5	0,86	0	0,66	1,13	1,31
#4	0	-0,5	0,86	0	-0,66	1,13	1,31
#5	0	-0,95	0,30	0	-1,66	0,52	1,74
#6	0	-0,93	-0,36	0	-1,6	-0,61	1,71

Y ya en último lugar para obtener los vectores de carga finales, se multiplican estos vectores por la magnitud de cada fuerza de las *Tablas 18 y 21*. En esta ocasión sumaremos directamente la componente Z del peso de las placas a la de la presurización.

Tabla 28. Vectores de carga de los vértices del Pasillo 1 y 2

Pasillo 1				Pasillo 2			
Aro#0	x	y	z	Aro#0	x	y	z
Nodos	Vectores de carga (Pa)			Nodos	Vectores de carga (Pa)		
#1	115626	-114130	73416	#1	-91051	93698	52544
#2	93238	-53596	112053	#2	-99973	72634	122839
#3	69785	0	46431	#3	-103274	0	126964
#4	93238	53596	112053	#4	-99973	-72634	122839
#5	115626	114130	73416	#5	-91051	-93698	52544
Aro#1				Aro#1			
Nodos				Nodos			
#1	0	-98255	-33783	#1	0	99364	-38329
#2	0	-121176	45811	#2	0	133925	41363
#3	0	-52636	117639	#3	0	76922	131052
#4	0	52636	117639	#4	0	-76922	131052
#5	0	121176	45811	#5	0	-133925	41363
#6	0	98255	-33783	#6	0	-99364	-38329
Aro#2				Aro#2			
Nodo				Nodo			
#1	0	-131485	-552	#1	0	130113	-4442
#2	0	-95957	83071	#2	0	117732	61725
#3	0	0	128698	#3	0	0	145971
#4	0	95957	83071	#4	0	-117732	61725
#5	0	131485	-552	#5	0	-130113	-4442
Aro#3				Aro#3			
Nodos				Nodos			
#1	0	-55706	-19153	#1	0	99364	-38329
#2	0	-59994	22681	#2	0	133925	41363
#3	0	-26534	59304	#3	0	76922	131052
#4	0	26534	59304	#4	0	-76922	131052
#5	0	59994	22681	#5	0	-133925	41363
#6	0	55706	-19153	#6	0	-99364	-38329

RESULTADOS

5.1 Fase inicial

5.1.1 Secciones

En esta última parte del análisis, se estudiará el tipo de sección que es más adecuada a las especificaciones requeridas.

El material del que se hará el módulo será basalto que como ya se ha comentado en la introducción tiene un límite de rotura de **14 MPa**. Para poder diseñar una configuración que sea resistente y segura no solo no se tiene que superar ese valor de la tensión si no que se debe establecer un coeficiente de seguridad suficiente. Este coeficiente mide la relación entre la tensión máxima que esta es capaz de soportar el material antes del fallo y la tensión a la que se somete la estructura en condiciones normales.

$$Coef. seg. = \frac{\sigma_{Rotura}}{\sigma_{MaxAplicada}} \quad (12)$$

En muchas estructuras habituales sometidas a presión el coeficiente de seguridad es del orden de **1,5**. Como las fuerzas más relevantes a las que se somete el módulo son las de presurización, se establecerá que cumpla como mínimo dicho valor.

El parámetro que el programa nos proporciona y que permite saber que tensión se está ejerciendo en cada zona de la estructura es la tensión de Von Mises (Pa) que se calcula con las tensiones principales del tensor de tensiones.

$$\sigma_{VMises} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (13)$$

Se estudiará el tipo de sección iterando entre varias configuraciones y comprobando cómo se comporta la estructura. En principio se aplica la misma sección a toda la estructura.

Para comprobar que sección se comporta mejor ante las cargas se han comparado varias similares en tamaño y se han aplicado solo las fuerzas del peso de la estructura.

Llegando a los siguientes resultados de la tensión de Von Mises:

Tabla 29. Estudio de secciones similares para el domo

SECCIONES	V. Mises (kPa)
Section 2 (Profile 2 [Caja]): Thickness: 0.03m Width: 0.1m Height: 0.1m	143,6
Section 3 (Profile 3 [Rectangular maciza]): Width: 0.1m Height: 0.1m	143,0
Section 4(Profile 4 [Tubo]): Radius: 0.05m Thickness: 0.03m	137,4
Section 5 (Profile 5[Circular maciza]): Radius: 0.05m	154,6

Se puede ver que la que mejor se comporta es la sección tubular, resultado que tiene sentido si tenemos en cuenta que las barras están sometidas únicamente a cargas de tracción a lo largo del eje longitudinal.

El siguiente paso es conocer el comportamiento con la estructura cuando aplicamos todas las cargas.

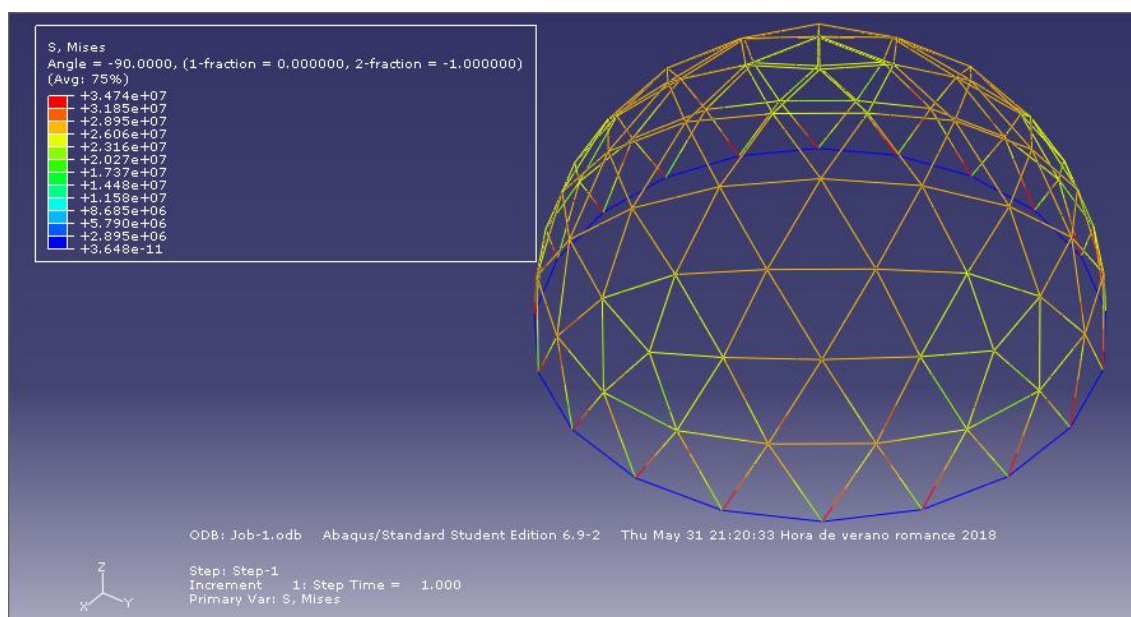


Figura 45.Resultado de la tensión de V. Mises (Pa) con sección única

Y como se puede ver, el valor máximo de la tensión de Von Mises indicado en la leyenda marca **34,74 MPa**. Valor que es claramente superior a la tensión de rotura (**14 MPa**) por lo que se debe variar el tamaño de la sección, tanto en el radio como en el grosor.

También se puede observar cómo existen barras en la que las tensiones son menores, como alrededor de los puntos correspondientes a los vértices del icosaedro (pentágonos,

color verde) y otras en las que es muy superior como las barras de la base, donde se produce la tensión máxima (color rojo).

Esto indica que existen zonas en las que la sección está sobredimensionada y otras infradimensionada. Es conveniente pues, estudiar la posibilidad de aplicar diferentes secciones a cada parte de la estructura. Algo que no supone demasiado problema desde el punto de vista de la fabricación.

La última característica notable que se percibe es que las barras de la base no están sometidas a ninguna carga de importancia. Esto es lógico, ya que toda la barra está fijada al suelo por lo que los esfuerzos se concentran en los vértices adyacentes anclados también al terreno. Por esta razón es posible modificar las condiciones de contorno para no tener anclajes redundantes, de forma que las restricciones se limitarán a los vértices que se encuentran en la base ($z = 0$).

Además, en las barras que confluyen en estos puntos se ve una concentración de tensiones mayor en una de ellas, que es debido a que la restricción no permite el giro. Esto lleva a cambiar el tipo de condición de contorno, limitando el movimiento en cualquier dirección, pero no el giro relativo (Pinned, $U_x=U_y=U_z=0$).

Es preciso iterar entre varios tamaños de secciones tubulares hasta obtener los resultados deseados. Con las dimensiones probadas inicialmente se sobrepasan los límites de rotura, es necesario entonces, aumentar considerablemente el tamaño de la sección.

Tras varias iteraciones con diversos tamaños, modificando tanto radio y grosor, como las zonas en las que se aplica cada perfil, se ha llegado a una configuración que satisface las especificaciones requeridas.

Se muestra a continuación las diferentes zonas y perfiles de sección empleadas.

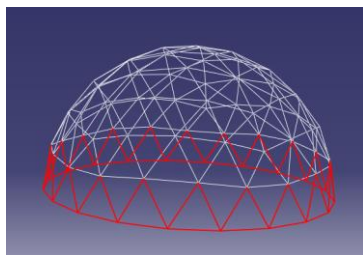


Figura 46. Sección 1 Domo

Sección 1 (Perfil 1[Tubular]): Radio: **0.1 m** Grosor: **0.08m**

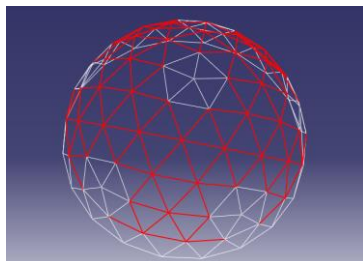
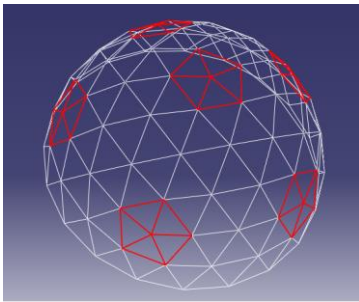


Figura 47. Sección 2 Domo

Sección 2 (Perfil 2[Tubular]): Radio: **0.1 m** Grosor: **0.07m**



Sección 3 (Perfil 3[Tubular]): Radio: 0.1 m Grosor: 0.06m

Figura 48. Sección 3 Domo

El resultado es un reparto más uniforme de las tensiones a lo largo de la estructura con valores muy similares en todas las barras.

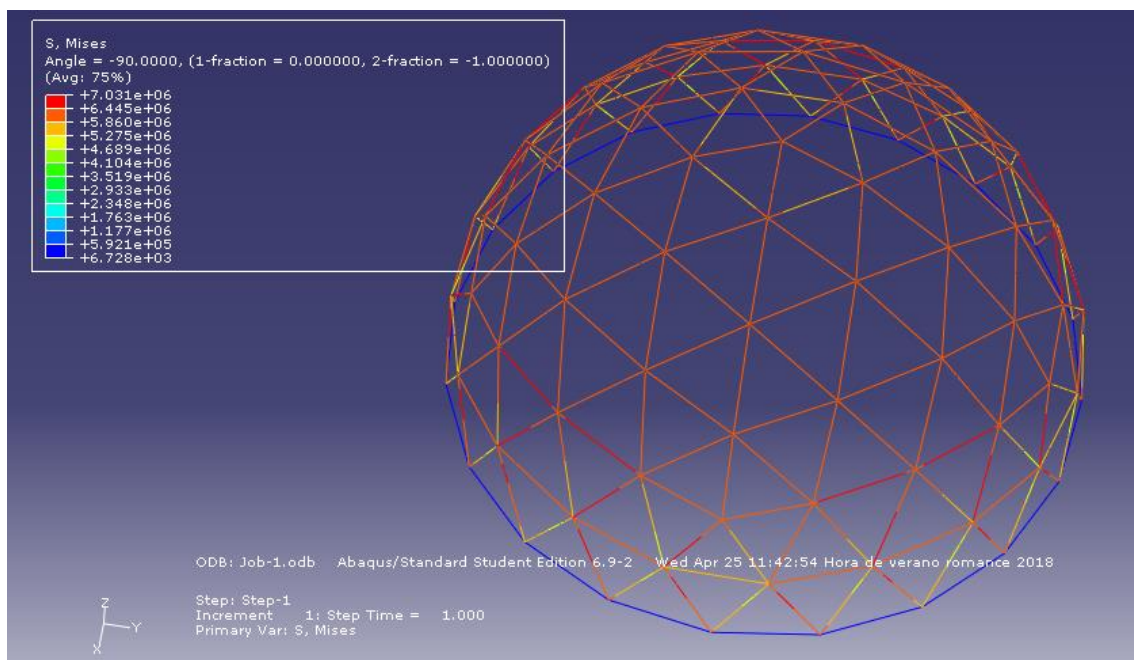


Figura 49. Resultados de la tensión de V. Mises (Pa) para secciones varias

Lo primero que se debe comprobar es el valor de la tensión de V. Mises que en este caso es de **7,031MPa**, que es una mejoría muy notable con respecto a la inicial, y esta obviamente por debajo de la tensión límite.

Con esta configuración se consigue un coeficiente de seguridad de **1.99**, lo que quiere decir que esta estructura puede soportar el doble de las cargas que se le aplican antes de la rotura.

5.2 Fase final

5.2.1 Secciones

Como en el apartado del domo, la última parte y más importante es la determinación de las secciones de las barras de la estructura.

Para ver cómo se comporta esta nueva configuración se mantendrán las secciones del domo y a las nuevas partes se les asignará una única sección de tamaño intermedio a las del domo.

Con las cargas que se han calculado se obtiene el siguiente diagrama:

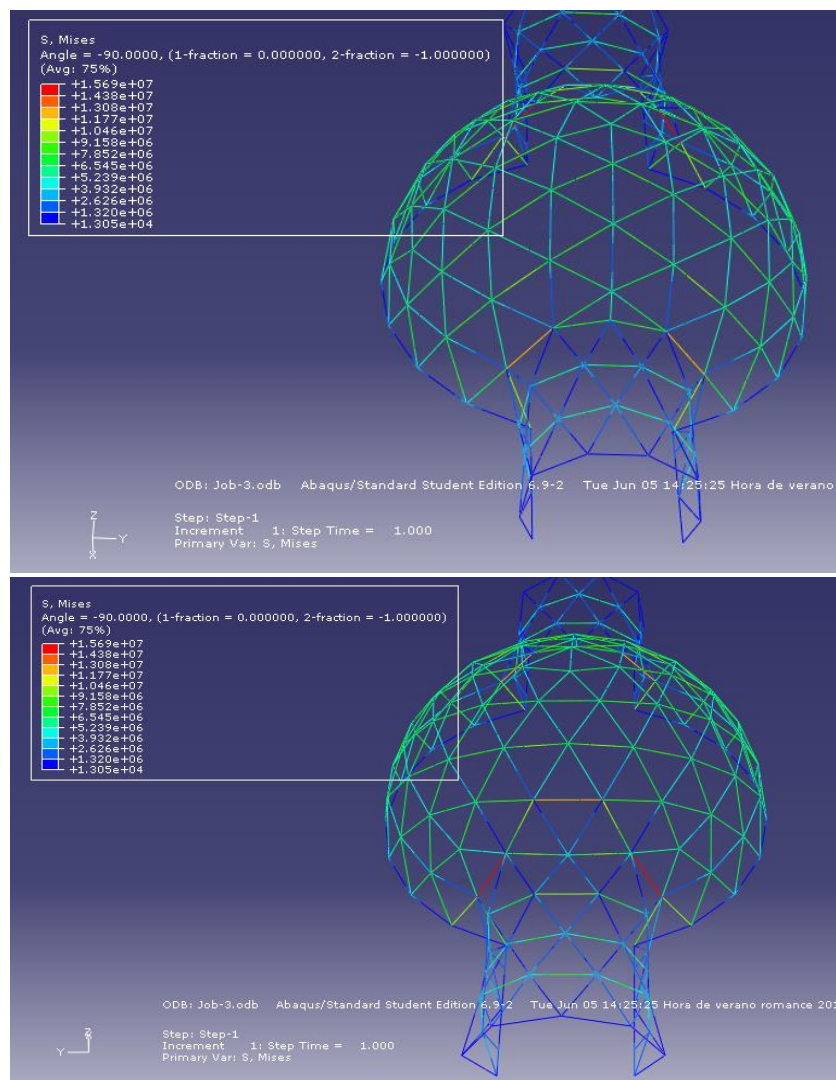


Figura 50. Resultado de la tensión de V. Mises (Pa) para estructura completa, seccion única

Lo que se puede deducir inmediatamente de estos resultados es la gran diferencia entre algunas barras, y lo muy sobredimensionadas que están, por ejemplo, las barras de los pasillos. Otra característica es que se sobrepasa el límite de rotura del material por lo que no solo tendremos que redistribuir las secciones si no las dimensiones de estas.

La estructura se comporta totalmente diferente a como lo hacía con el domo. Es por otra parte esperable ya que como se ha explicado cada una de las barras de un domo

geodésico es una pieza clave para distribuir las cargas a lo largo de este. Se percibe levemente en la imagen como las barras más alineadas con el eje X están menos cargadas que las que están más transversales. Además, hay zonas muy localizadas en los aros#0 de ambos pasillos que están muy infradimensionadas, y que necesitarán de una sección especial.

Teniendo estas observaciones en cuenta se ha diseñado una serie de secciones de distintas dimensiones y distribuidas en diferentes zonas. Después de iterar varias veces como ya se hizo en el ejemplo del domo, colocando secciones más gruesas en zonas críticas, se ha llegado a los valores óptimos en los que la estructura se comporta según las especificaciones.

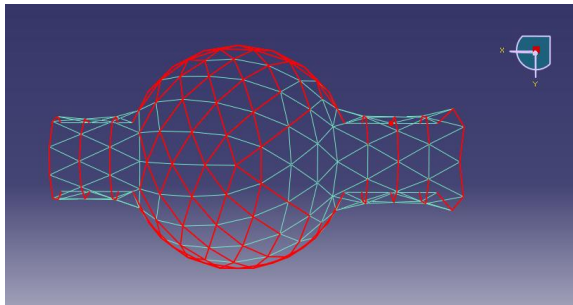


Figura 51. Sección 1 estructura completa

Sección 1 (Perfil [Tubular]): Radio_{ext}:
0.11 m Grosor: 0.08m

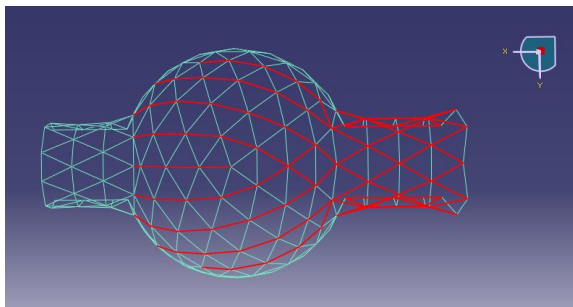


Figura 52. Sección 2 estructura completa

Sección 2 (Perfil [Tubular]): Radio_{ext}:
0.09 m Grosor: 0.06m

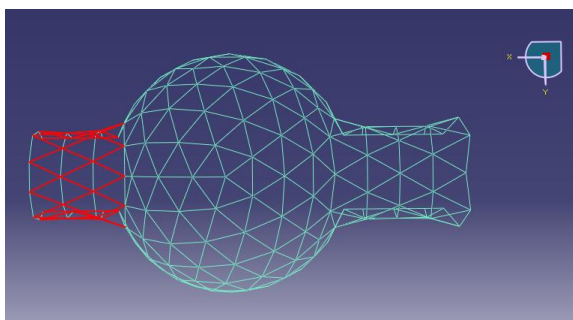
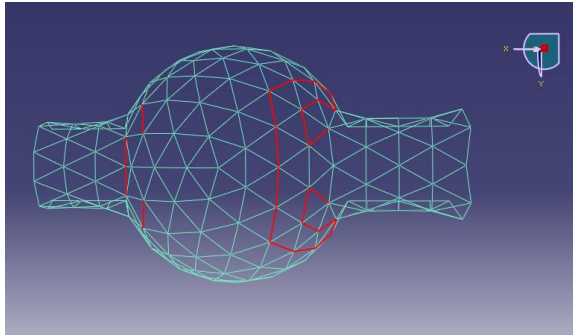


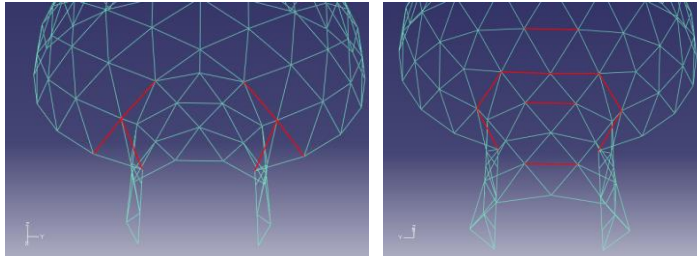
Figura 53. Sección 3 estructura completa

Sección 3 (Perfil [Tubular]): Radio_{ext}:
0.05 m Grosor: 0.02m



Sección 4 (Perfil [Tubular]): Radio_{ext}:
0.13 m Grosor: 0.09m

Figura 54. Sección 4 estructura completa



Sección 5 (Perfil [Tubular]):
Radio_{ext}: **0.14 m Grosor: 0.11m**

Figura 55. Sección 5 estructura completa

Esta configuración de secciones proporciona un equilibrio en las tensiones que se reparte de manera más uniforme por todo el sistema. El mapa de colores de tensiones final queda más homogéneo como se puede apreciar en las imágenes:

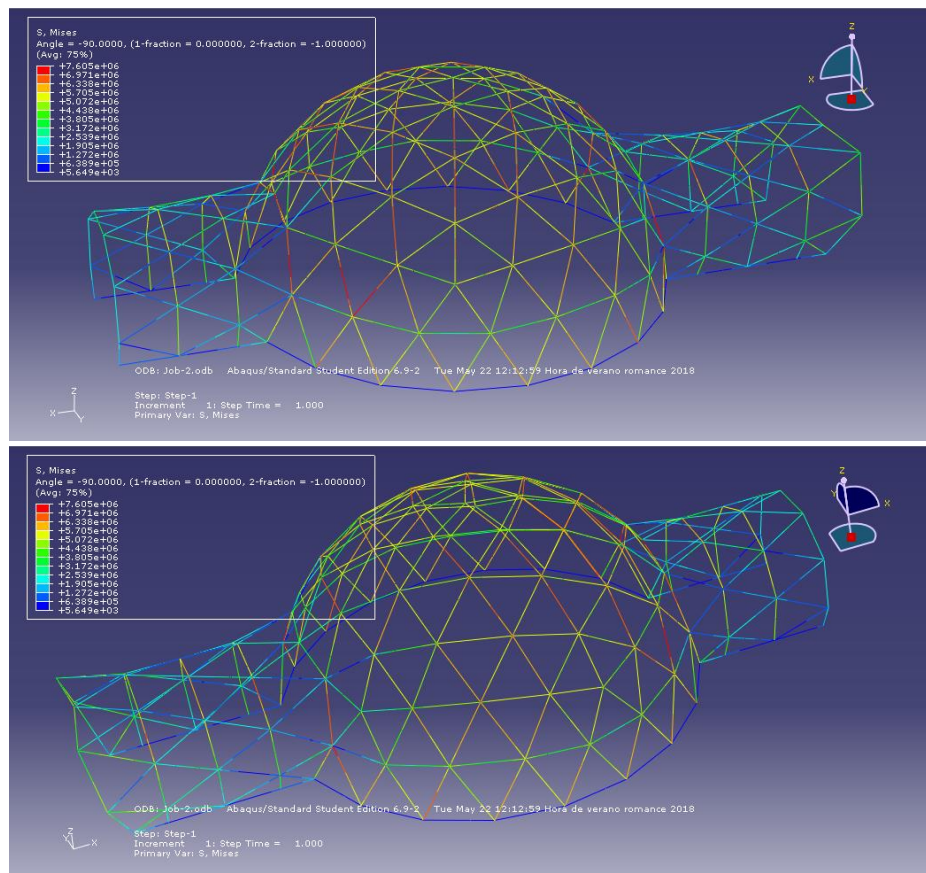


Figura 56. Resultados de la tensión de Von Mises (Pa) para estructura completa, secciones finales

Este es el resultado final de del análisis. Se consigue una tensión máxima de Von Mises de **7.605 MPa**, lo que da un coeficiente de seguridad de **1.84**, que sigue estando por encima del 1.5 que se fijó como mínimo.

En las barras entre los aros de los pasillos se ve como las tensiones son menores en el intervalo de **1 a 4 MPa**, por eso tienen las secciones más delgadas. El siguiente intervalo de tensiones medias correspondería al domo geodésico con tensiones de **4 a 6 MPa**. Y en algunos puntos cercanos a las zonas más cargadas (juntas entre pasillos y domo) es donde se alcanzan tensiones del orden de **7 MPa**.

5.3 Pandeo

Al observar solo el valor de la tensión de Von Mises no podemos distinguir que barras están traccionadas y cuales comprimidas. En un principio se suponen todas traccionadas como en el caso del domo completo, pero esto puede no ser verdad en las barras cerca de las juntas entre el domo y los pasillos. Esto se demuestra viendo en el menú de visualización de Abaqus el resultado de las tensiones en las direcciones principales, y comprobando si hay algunas con valor negativo.

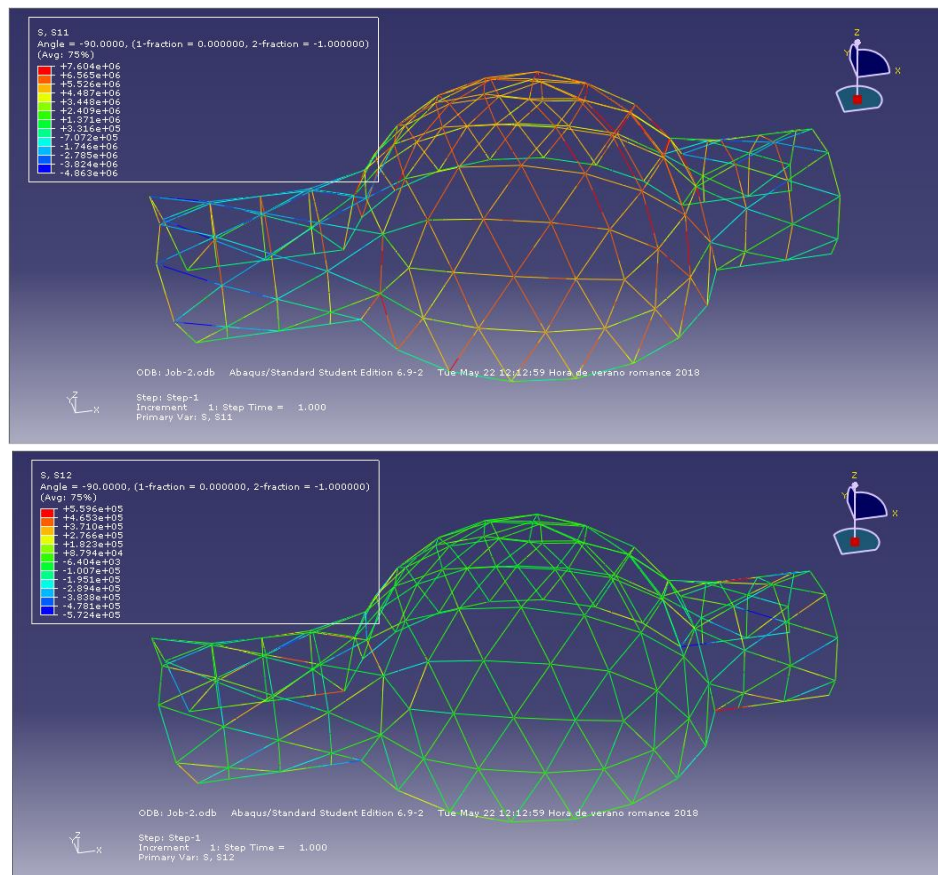


Figura 57. Resultados de las tensiones (Pa) en las direcciones principales, estructura final

Como se puede comprobar las barras entre los aros de los pasillos y como se sospechaba, las cercanas a las juntas (Aro#0) tienen un valor negativo, por lo que están sometidas a compresión.

Al estar comprimidas pueden sufrir pandeo, por lo que hay que comprobar si es así. Analíticamente se comprobaría con la fórmula de Euler:

$$P_C = \frac{\pi^2 EI}{(\alpha l)^2} \quad (14)$$

Esta ecuación nos proporciona la carga crítica de pandeo, es decir la carga que habría que ejercer para que la barra empezar a pandear. En nuestro caso $\alpha=1$ al ser las barras biapoyadas. Se muestra a continuación las cargas críticas de pandeo para cada una de las barras sometidas a compresión.

Tabla 30. Carga crítica de Euler (N) para las barras sometidas a compresión

Barras		Carga crítica de Euler (N)	Inercia (kg·m ²)	Longitud (m)	R _{int} (m)	R _{ext} (m)	Masa (kg)
B Sección 2		1,57E+11	0,386	1,329	0,03	0,09	85,67
B Sección 1		3,53E+11	0,866	1,329	0,03	0,11	133,27
E Sección 2		1,48E+11	0,408	1,408	0,03	0,09	90,77
PAS 1 Sección 3							
#0/#1	1	2,92E+10	0,015	0,6	0,03	0,05	8,60
	2	1,95E+10	0,022	0,9	0,03	0,05	12,89
	3	1,46E+10	0,029	1,2	0,03	0,05	17,19
	4	1,46E+10	0,029	1,2	0,03	0,05	17,19
	5	1,35E+10	0,032	1,3	0,03	0,05	18,62
	6	1,40E+10	0,030	1,25	0,03	0,05	17,91
	7	1,37E+10	0,031	1,28	0,03	0,05	18,34
	8	1,37E+10	0,031	1,28	0,03	0,05	18,34
	9	1,40E+10	0,030	1,25	0,03	0,05	17,91
	10	1,35E+10	0,032	1,3	0,03	0,05	18,62
	11	1,46E+10	0,029	1,2	0,03	0,05	17,19
	12	1,46E+10	0,029	1,2	0,03	0,05	17,19
	13	1,95E+10	0,022	0,9	0,03	0,05	12,89
	14	2,92E+10	0,015	0,6	0,03	0,05	8,60
#1/#2	1	1,51E+10	0,028	1,16	0,03	0,05	16,62
	2	1,30E+10	0,033	1,35	0,03	0,05	19,34
	3	1,36E+10	0,031	1,29	0,03	0,05	18,48
	4	1,36E+10	0,031	1,29	0,03	0,05	18,48
	5	1,36E+10	0,031	1,29	0,03	0,05	18,48
	6	1,36E+10	0,031	1,29	0,03	0,05	18,48
	7	1,36E+10	0,031	1,29	0,03	0,05	18,48
	8	1,36E+10	0,031	1,29	0,03	0,05	18,48
	9	1,36E+10	0,031	1,29	0,03	0,05	18,48
	10	1,36E+10	0,031	1,29	0,03	0,05	18,48
	11	1,36E+10	0,031	1,29	0,03	0,05	18,48

	12	1,36E+10	0,031	1,29	0,03	0,05	18,48
	13	1,30E+10	0,033	1,35	0,03	0,05	19,34
	14	1,51E+10	0,028	1,16	0,03	0,05	16,62
PAS 2 Sección 2							
#0/#1	1	2,94E+11	0,206	0,71	0,03	0,09	45,77
	2	2,20E+11	0,276	0,95	0,03	0,09	61,24
	3	1,63E+11	0,371	1,28	0,03	0,09	82,52
	4	1,62E+11	0,374	1,29	0,03	0,09	83,16
	5	1,42E+11	0,426	1,47	0,03	0,09	94,76
	6	1,40E+11	0,432	1,49	0,03	0,09	96,05
	7	1,57E+11	0,386	1,33	0,03	0,09	85,74
	8	1,57E+11	0,386	1,33	0,03	0,09	85,74
	9	1,40E+11	0,432	1,49	0,03	0,09	96,05
	10	1,42E+11	0,426	1,47	0,03	0,09	94,76
	11	1,62E+11	0,374	1,29	0,03	0,09	83,16
	12	1,63E+11	0,371	1,28	0,03	0,09	82,52
	13	2,20E+11	0,276	0,95	0,03	0,09	61,24
	14	2,94E+11	0,206	0,71	0,03	0,09	45,77
#1/#2	1	1,80E+11	0,337	1,16	0,03	0,09	74,78
	2	1,57E+11	0,386	1,33	0,03	0,09	85,74
	3	1,62E+11	0,374	1,29	0,03	0,09	83,16
	4	1,61E+11	0,377	1,3	0,03	0,09	83,81
	5	1,61E+11	0,377	1,3	0,03	0,09	83,81
	6	1,61E+11	0,377	1,3	0,03	0,09	83,81
	7	1,56E+11	0,389	1,34	0,03	0,09	86,38
	8	1,56E+11	0,389	1,34	0,03	0,09	86,38
	9	1,61E+11	0,377	1,3	0,03	0,09	83,81
	10	1,61E+11	0,377	1,3	0,03	0,09	83,81
	11	1,61E+11	0,377	1,3	0,03	0,09	83,81
	12	1,62E+11	0,374	1,29	0,03	0,09	83,16
	13	1,57E+11	0,386	1,33	0,03	0,09	85,74
	14	1,80E+11	0,337	1,16	0,03	0,09	74,78

Como se puede apreciar, los valores de la carga crítica son muy altos. Para hacer una comparación y saber si se sobrepasa este valor, se calculará la fuerza máxima a compresión que soportan las barras sometidas a mayor tensión. El valor de la tensión en las barras entre los aros del pasillo es aproximadamente de **5 MPa**, si multiplicamos por el área de la sección asignada a esas barras **0.0226 m²**, obtenemos un valor de **113 kN**.

Queda claro que el valor de la carga crítica en esas barras, que está alrededor de los **20 GN**, queda muy lejos del que soportaría en la realidad.

Estos valores tan altos de carga crítica se deben a que las barras tienen una longitud muy corta y una sección muy grande, en comparación con los elementos que se caracterizan por sufrir este tipo de efecto.

MEJORAS Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 Introducción

Se ha visto un modelo de estructura funcional y factible que se ajusta a la misión planteada al inicio. No obstante, y como la tecnología no deja de avanzar, existen algunos aspectos a destacar en los que se podría mejorar el diseño y funcionalidad de estos módulos.

6.2 Estudio de secciones individualmente

Como se ha visto, según el comportamiento del domo se han diseñado un conjunto de secciones que mejoraban la distribución de las tensiones. Pero ese diseño se podría hacer más minucioso viendo qué tipo de sección debería tener cada barra individualmente.

Se podría hacer una cantidad de iteraciones mucho mayor e ir estudiando qué sección se adecua más al tipo de esfuerzo que está sufriendo.

La técnica de fabricación nos permite modificar cada parte de la estructura como queramos. No solo se podría concretar la sección en cada una de las vigas, sino que esa sección podría no ser constante. Es decir, se podría concebir la estructura como una sucesión de barras en la que la sección fuese creciendo o decreciendo. Teniendo barras con formas muy distintas, por ejemplo, barras con una ligera conicidad, aumentando la sección a medida que se acercan a zonas de mayor acumulación de tensiones.

6.3 Estructuras tipo Lattice

Otra gran innovación que se podría aplicar en este diseño es la utilización de las llamadas estructuras aligeradas tipo Lattice. Estas estructuras se ven en la naturaleza como en los huesos en el que el interior está compuesto por una especie de espuma que los hace menos pesados o las características celdas hexagonales de las abejas [44].

Se han concebido con el objetivo de obtener las mismas o mejores prestaciones que los objetos macizos, pero con un ratio resistencia/peso mucho mayor.

El diseño más utilizado en fabricación aditiva consiste en un entramado de barras más pequeñas que se repiten en las tres dimensiones siguiendo patrón determinado por una celdilla unitaria y que van formando una red.

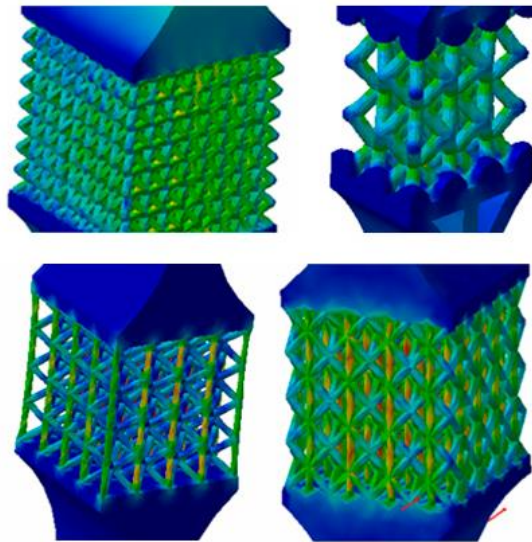


Figura 58. Imagen de un análisis de estructuras tipo lattice por el método de elementos finitos [7]

Las propiedades de estas estructuras dependerán de cómo se posicionan las barras en la celda unitaria de la que se parte y de la fracción volumétrica que ocupe respecto al material macizo [44].

Tienen propiedades que sería de gran utilidad en un ambiente tan inhóspito como Marte. Algunas de ellas son [44]:

- **Aislantes térmicos.** Por el aire encerrado en el interior.
- **Intercambiadores de calor.** Si se hiciera circular un fluido a través de sus celdas su elevada superficie específica extraería calor muy eficientemente.
- **Absorción de energía.** Muy eficientes a la hora de absorber impactos.
- **Bio compatibilidad.** Su porosidad resulta óptima para adaptarse a tejidos humanos.

Su diseño es complejo y se requiere software CAD/CAM que automatiza en proceso de repetición del patrón unitario.

Presentan algunos inconvenientes en la fabricación, con la tecnología usada en este trabajo (modelado por deposición fundida) se podría necesitar la creación de soportes difíciles de eliminar después [44].

6.4 Diseño de estructuras geodésicas según su función

A lo largo de este proyecto el diseño se ha centrado en un único tipo de configuración geodésica. Sin embargo, existe una variedad enorme de posibles formas geodésicas que podrían tener aplicación en una misión espacial. Este tipo de estructuras suponen una gran herramienta, muy versátil y que se podría explotar de muchas formas con grandes ventajas respecto a las convencionales.

A medida que la misión de colonización avance, se necesitarán edificaciones adicionales a las meras estructuras destinadas a albergar a los astronautas.

Se podrían diseñar estructuras cuyos vértices en vez de ser tangentes a una esfera lo fuesen a un elipsoide, obteniendo configuraciones más aplanadas o más abultadas según las necesidades. Domos más achatados podrían servir como tejado de posibles estructuras subterráneas.

También se podrían configurar un domo a partir de un octaedro, para poder obtener zonas rectangulares por donde poder trincar la estructura, e instalar puertas u otros accesos más fácilmente.

Y con otras subdivisiones se podrían conseguir formas hexagonales o pentagonales que podrían servir para diseñar estructuras desplegadas que pudiesen ser transportables para misiones de exploración.

CONCLUSIONES

7.1 Conclusiones

Como se ha visto, a lo largo del proyecto y en concordancia con el objetivo principal, se ha ido exponiendo el diseño de una estructura factible que se puede fabricar con materiales in-situ y dando unos resultados favorables.

Al principio del trabajo se ha estudiado y comprobado la viabilidad de un proyecto como este, siendo más rentable que otros muchos proyectos. La causa de esto es el ahorro en el transporte de material y además la posibilidad de ampliar la base y los habitáculos en el destino cuando y como se quiera supone una de las mayores ventajas.

En el apartado tercero del capítulo segundo se detalla la misión, dentro de la cual encajaría el diseño estudiado. Cada una de las partes descritas y las fases de esa misión se ajustan al modelo de este trabajo.

Más adelante se explicaba paso a paso el origen del tipo de estructuras y la base matemática y geométrica que se ha tenido en cuenta para justificar así, el porqué de la elección de una cúpula con forma de domo geodésico.

Para acabar de cumplir el objetivo propio del diseño en sí, se ha seguido un método de nombramiento de cada parte de la estructura y posición exacta en el espacio. Esto más allá de esquematizar los elementos unidos, resulta de utilidad a posteriori teniendo en cuenta que la fabricación se hará con máquinas de control numérico.

También se ha diseñado las estructuras en la segunda fase de construcción que, si bien, no siguen una lógica geométrica como la del domo si se han diseñado siguiendo la misma metodología que con el resto del conjunto.

En el cuarto capítulo se han mostrado los cálculos de las magnitudes de las principales fuerzas que actuarían directamente sobre el habitáculo, según las condiciones atmosféricas descritas en el primer capítulo y las especificaciones a cumplir para hacer posible la supervivencia en el planeta.

Las más importantes, como se ha visto, son el peso propio (en el apartado anterior 3.4, se adjunta una tabla mostrando el volumen de las barras y la masa que supone la estructura completa), la presurización y también las tensiones por las dilataciones térmicas.

En la parte final del estudio, habiendo incluido y discretizado la geometría de la estructura con el software utilizado (Abaqus) y aplicado las correspondientes fuerzas y restricciones a cada punto, se han obtenido mediante análisis de elementos finitos los distintos valores de tensión que soporta cada elemento que compone el sistema.

Tras varias iteraciones se han ido diseñando las secciones que permitían que con el uso de basalto la estructura resistiera y resultase así un diseño completo y resistente dentro

de unos márgenes de seguridad. Con esas variaciones en las secciones se ha podido llegar a un resultado con el que el módulo aguanta en ambas fases de la construcción. Con el diseño ya completo, se ha estudiado otro fenómeno como el pandeo, que no ha llegado a tener un efecto significativo en las barras que trabajaban a compresión debido a las dimensiones de estas.

Por último, se han discutido, en concordancia con los resultados, diferentes mejoras que se podrían realizar en el futuro, con el consiguiente desarrollo de determinadas tecnologías. Estas mejoras podrían mejorar sustancialmente el comportamiento de los habitáculos considerados.

7.2 Discusiones

La elaboración de este proyecto ha presentado varias dificultades a la hora de conformar el diseño final.

Por ejemplo, las continuas iteraciones en las secciones de las dos fases que se han realizado hasta llegar a un resultado aceptable. O los intentos de truncar el domo por distintas partes, que no siempre permitía que la estructura siguiese siendo estable.

Como ya se ha comentado en el capítulo seis, hay campos de la tecnología que mejorarían en varios aspectos el diseño propuesto.

Un mayor estudio de la radiación a la que estarían expuestos los astronautas y de las condiciones que tendrían que enfrentar, podría servir para saber qué protección es la más adecuada y si el grosor de las losas y secciones de barras estudiadas es suficiente.

Datos sobre la actividad del subsuelo marciano también podrían ser tenidos en cuenta en el modelo. El proyecto se podría extender al diseño de una base completa diseñando cada módulo de forma personalizada, como ya se ha comentado anteriormente.

Existen tecnologías que se podrían aplicar a este proyecto y que con los datos que se disponen hasta el momento todo apunta a que se mejorarían las prestaciones y condiciones de una posible futura misión a Marte.

Personalmente, ha sido muy interesante y gratificante investigar acerca de los temas relacionados con el espacio y la exploración espacial.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Sagan, *Un Punto Azul Pálido , Una Visión del Futuro Humano en el Espacio*. Planeta, 2003.
- [2] L. R. Scherer, «The Apollo missions», *Encyclopedia of Planetary Science*, pp. 23-25, 1971.
- [3] NASA, «Curiosity Overview», 2015. [En línea]. Disponible en: https://www.nasa.gov/mission_pages/msl/overview/index.html.
- [4] NASA/JPL-Caltech, «NASA's Mars Exploration Program: The InSight Lander». [En línea]. Disponible en: <https://mars.nasa.gov/resources/21439/the-insight-lander/>.
- [5] NASA, «Mars Exploration Program: Overview», *Mars Science Lab*, 2012. [En línea]. Disponible en: https://mars.nasa.gov/#red_planet/1.
- [6] A. Bowyer, «3D Printing and Humanity's First Imperfect Replicator», *3D Printing and Additive Manufacturing*, vol. 1, n.º 1, pp. 4-5, mar. 2014.
- [7] EDDM, «Fabricación Aditiva e Industria 4.0 | Blog Ingenius». [En línea]. Disponible en: <https://eddm.es/blog-ingenius/fabricacion-aditiva-e-industria-4-0/>.
- [8] B. Novakovic, «Senenmut: An Ancient Egyptian Astronomer», Publication of Astronomical Observatory of Belgrade, 2008.
- [9] J. Wade, B. Dyck, R. M. Palin, J. D. P. Moore, y A. J. Smye, «The divergent fates of primitive hydrospheric water on Earth and Mars», *Nature*, vol. 552, n.º 7685, pp. 391-394, 2017.
- [10] C. Zeitlin, T. Cleghorn, F. Cucinotta, P. Saganti, V. Andersen, K. Lee, L. Pinsky, W. Atwell, y R. Turner, *Results from the Martian Radiation Environment Experiment MARIE*. 2003.
- [11] R. Zubrin y R. Wagner, *The case for Mars : the plan to settle the red planet and why we must*. Free Press, 2011.
- [12] B. Lansdorp, A. Wielders, «Mars One: The Technology». [En línea]. Disponible en: <http://www.mars-one.com/mission/the-technology>
- [13] B. L. Ehlmann, J. Chowdhury, T. C. Marzullo, R. Eric Collins, J. Litzenberger, S. Ibsen, W. R. Krauser, B. Dekock, M. Hannon, J. Kinnevan, R. Shepard, y F. Douglas Grant, «Humans to Mars: A feasibility and cost-benefit analysis», *Acta Astronautica*, vol. 56, n.º 9-12, pp. 851-858, 2005.
- [14] M. T. Madigan y B. L. Marrs, «Extremophiles.», *Scientific American*, vol. 276, n.º 4, pp. 82-7, abr. 1997.
- [15] NASA, «Report of the 90-Day Study on Human Exploration of the Moon and Mars», Washington, 1989.
- [16] NASA, «FY2003 Budget, NASA Space Science Overview», 2003. [En línea]. Disponible en: https://www.nasa.gov/pdf/118829main_FY03_budget.pdf
- [17] H. H. Koelle y D. G. Stephenson, «International Academy of Astronautics 5th

cosmic study--preparing for a 21st century program of integrated, Lunar and Martian exploration and development (executive summary).», *Acta astronautica*, vol. 52, n.º 8, pp. 649-62, abr. 2003.

- [18] D. T. Lyons, J. G. Beerer, P. Esposito, M. D. Johnston, y W. H. Willcockson, «Mars Global Surveyor: Aerobraking Mission Overview», *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 36, n.º 3, pp. 307-313, 1999.
- [19] J. Aroesty, R. Zimmerman, y J. Logan, «Human Support Issues and Systems for the Space Exploration Initiative», RAND Corporation, 1991.
- [20] B. Kading y J. Straub, «Utilizing in-situ resources and 3D printing structures for a manned Mars mission», *Acta Astronautica*, vol. 107, pp. 317-326, 2015.
- [21] NASA, «Mars Fact Sheet», 2016. [En línea]. Disponible en: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html>.
- [22] C. Stoker, J. Gooding, T. Roush, A. Banin, D. Burt, B. C. Clark, G. Flynn, y O. Gwynne, *The physical and chemical properties and resource potential of Martian surface soils*. 1993.
- [23] T. N. Titus, «Water, water everywhere», *Nature*, vol. 428, n.º 6983, pp. 610-611, abr. 2004.
- [24] P. Barry, «Methane Blast | Science Mission Directorate». [En línea]. Disponible en: https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2007/04may_methaneblast.
- [25] G. De Angelis, M. S. Cloudsley, R. C. Singletary, y J. W. Wilson, «A new Mars radiation environment model with visualization», *Advances in Space Research*, vol. 34, n.º 6, pp. 1328-1332, ene. 2004.
- [26] ICRP, «Las recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica.», *Publicación 103*, pp. 77-78, 2007.
- [27] NASA, «NASA SPACE FLIGHT HUMAN SYSTEM STANDARD VOLUME 1: CREW HEALTH MEASUREMENT SYSTEM IDENTIFICATION: NONE», vol. 1, 2007.
- [28] D. M. Hassler, C. Zeitlin, R. F. Wimmer-Schweingruber, B. Ehresmann, S. Rafkin, J. L. Eigenbrode, D. E. Brinza, G. Weigle, S. Böttcher, E. Böhm, S. Burmeister, J. Guo, J. Köhler, C. Martin, G. Reitz, F. A. Cucinotta, M.-H. Kim, D. Grinspoon, M. A. Bullock, A. Posner, J. Gómez-Elvira, A. Vasavada, J. P. Grotzinger, M. S. MSL Science Team, y the M. S. Team, «Mars' surface radiation environment measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity rover.», *Science (New York, N.Y.)*, vol. 343, n.º 6169, p. 1244797, ene. 2014.
- [29] D. Marin, «La radiación y los viajes tripulados a Marte. ¿Barrera infranqueable o riesgo asumible? | Astronáutica | Eureka». [En línea]. Disponible en: <http://danielmarin.naukas.com/2018/01/03/la-radiacion-y-los-viajes-tripulados-a-marte-barrera-infranqueable-o-riesgo-asumible/>.
- [30] Drake y B. G., «Reference Mission Version 3.0 Addendum to the Human Exploration of Mars: The Reference Mission of the NASA Mars Exploration Study Team. Addendum; 3.0», jun. 1998.
- [31] R. A. Schultz, «Brittle strength of basaltic rock masses with applications to Venus», *Journal of Geophysical Research*, vol. 98, n.º E6, p. 10883, 1993.

- [32] M.-H. Y. Kim, S. A. Thibeault, J. W. Wilson, L. C. Simonsen, L. Heilbronn, K. Chang, R. L. Kiefer, J. A. Weakley, y H. G. Maahs, «Development and Testing of in situ Materials for Human Exploration of Mars», *High Performance Polymers*, vol. 12, n.º 1, pp. 13-26, mar. 2000.
- [33] M. Petrol, J. Petrol, B. Volcanol, G. Coe, y L. Aline, «Igneous Petrology», vol. 7, pp. 725-744, 1982.
- [34] USGS, «USGS: Volcano Hazards Program Glossary - Basalt». [En línea]. Disponible en: <https://volcanoes.usgs.gov/vsc/glossary/basalt.html>.
- [35] B. Berman, «3-D printing: The new industrial revolution», *Business Horizons*, vol. 55, n.º 2, pp. 155-162, mar. 2012.
- [36] M. Apellaniz, «Extrusion deposition: Fused Deposition Modeling (FDM) - Photo». [En línea]. Disponible en: <https://www.additive3d.com/extrusion-deposition-fused-deposition-modeling-fdm/>.
- [37] R. A. Barr, C.I. Chung, «Auger-type extruder», E.E.U.U., US3487503A, 28-jun-1967.
- [38] D. Cadogan, M. Grahne, M. Mikulas, y I. A. Federation, " *Inflatable Space Structures: A New Paradigm for Space Structure Design*". Paris: International Astronomical Federation, 1998.
- [39] G. Cesaretti, E. Dini, X. De Kestelier, V. Colla, y L. Pambaguian, «Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology», *Acta Astronautica*, vol. 93, pp. 430-450, 2014.
- [40] H. Kenner, " *Geodesic math and how to use it*". University of california press, 2003.
- [41] «Geodesic dome calculator». [En línea]. Disponible en: http://acidome.ru/lab/calc/#1/2_Cone_4V_R5_beams_150x50.
- [42] J. M. Cubo Perez, «Aplicación del análisis por elementos finitos en Ingeniería naval», Universidad de Cadiz, 2010.
- [43] M. M. Santiuste Romero, Carlos; Artero Guerrero, José Alfonso; Moure Cuadrado, «Elasticidad y resistencia de materiales, Manual Abaqus», UC3M, 2013.
- [44] EDDM, «Estructuras aligeradas de tipo lattice en fabricación aditiva | Blog Ingenius». [En línea]. Disponible en: <https://eddm.es/blog-ingenius/estructuras-aligeradas-tipo-lattice-fabricacion-aditiva/>.

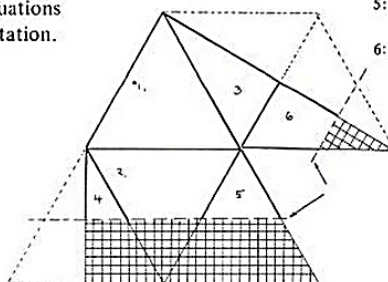
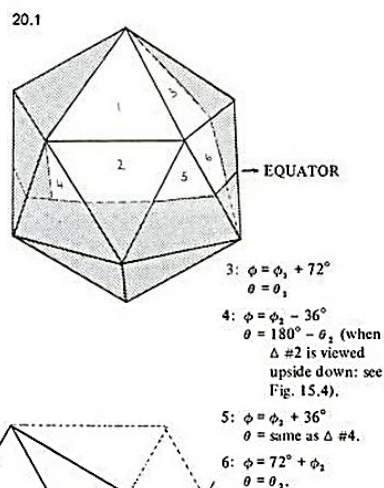
ANEXOS

20. Class I Method 1 Icosahedral Coordinates

Data are given for Class I ico breakdowns of the following frequencies: 10, 8, 6, 5, 4, 3, 2. Pick the vertex labels for the frequency you are using out of the proper column at the left, and read ϕ and θ values from the two columns at the right.

Each table covers *two* ico faces: the #1 triangle whose corners are 0,0; 0, arctan 2; 72, arctan 2; and the downward-pointing #2 triangle beneath it whose corners are 0, arctan 2; 72, arctan 2; 36, (180 - arctan 2): see Diagram 12.3. For spheres use only the Symmetry Triangle shown in Diagram 12.2. For ellipsoids of revolution (one cross-section circular) use the left-hand half of both triangles as far down as the proposed truncation plane. For structures with two non-circular cross-sections you need a 90° span of ϕ values as well. Diagram 20.1 shows how these can be extrapolated. But such structures have more tractable symmetries if rotated so that an edge, not a vertex, is at the zenith: see Chapter 15.

An HP-65 program using Equations 12.4 through 12.8 generated the values for Triangle #1. A second program using Equations 14.1, 14.2 then generated the Triangle #2 points by rotation.



ICOSAHEDRON CLASS I COORDINATES: Frequencies 8, 4, 2

2v	4v	8v	ϕ	θ
0,0	0,0	0,0	00.0000000	00.0000000
		1,0	00.0000000	6.8485493
		1,1	72.0000000	6.8485493
	1,0	2,0	00.0000000	14.5454366
		2,1	36.0000000	11.8548751
	1,1	2,2	72.0000000	14.5454366
		3,0	00.0000000	22.9342438
		3,1	22.3861776	19.4026533
		3,2	49.6138225	19.4026533
		3,3	72.0000000	22.9342438
1,0	2,0	4,0	00.0000000	31.7174744
		4,1	16.0353713	28.0116135
	2,1	4,2	36.0000000	26.5650512
		4,3	55.9646288	28.0116135
1,1	2,2	4,4	72.0000000	31.7174744
		5,0	00.0000000	40.5007050
		5,1	12.4463843	37.0083770
		5,2	27.7323015	34.9242784
		5,3	44.2676986	34.9242784
		5,4	59.5536157	37.0083770
		5,5	72.0000000	40.5007050
	3,0	6,0	00.0000000	48.8895123
		6,1	10.1562304	45.8486935
	3,1	6,2	22.3861776	43.6469271
		6,3	36.0000000	42.8320885
	3,2	6,4	49.6138225	43.6469271
		6,5	61.8437696	45.8486935
	3,3	6,6	72.0000000	48.8895123
		7,0	00.0000000	56.5863995
		7,1	8.5725404	54.1031325
		7,2	18.7046980	52.0961412
		7,3	30.0743861	50.9544734
		7,4	41.9256139	50.9544734
		7,5	53.2953021	52.0961412
		7,6	63.4274596	54.1031325
		7,7	72.0000000	56.5863995

2v	4v	8v	ϕ	θ
2,0	4,0	8,0	00.0000000	63.4349488
		8,1	7.4137289	61.5115731
	4,1	8,2	16.0353713	59.8480232
		8,3	25.7052785	58.6968610
2,1	4,2	8,4	36.0000000	58.2825256
		8,5	46.2947215	58.6968610
	4,3	8,6	55.9646288	59.8480232
		8,7	64.5862711	61.5115731
2,2	4,4	8,8	72.0000000	63.4349488

(Triangle #2)				
	9,1	4.3045403	69.0387834	
	9,2	12.1989876	67.6108929	
	9,3	21.1768230	66.4786457	
	9,4	30.9587180	65.8438654	
	9,5	41.0412821	65.8438654	
	9,6	50.8231770	66.4786457	
	9,7	59.8010124	67.6108929	
	9,8	67.6954597	69.0387834	

	5,1	10,2	8.7723551	75.4545635
		10,3	17.0666553	74.5700194
	5,2	10,4	26.2676986	73.9549430
		10,5	36.0000000	73.7329627
	5,3	10,6	45.7323015	73.9549430
		10,7	54.9333447	74.5700194
	5,4	10,8	63.2276449	75.4545635

		11,3	13.3560643	82.5366786
		11,4	21.9478021	82.1599429
		11,5	31.2307464	81.9488415
		11,6	40.7692536	81.9488415
		11,7	50.0521979	82.1599429
		11,8	58.6439357	82.5366786

3,1	6,2	12,4	18.0000000	90.0000000
		12,5	26.7723551	90.0000000
	6,3	12,6	36.0000000	90.0000000
		12,7	45.2276449	90.0000000
3,2	6,4	12,8	54.0000000	90.0000000

140 CLASS I METHOD I ICOSAHEDRAL COORDINATES

(Continued)

2v	4v	8v	ϕ	θ
		13,5	22.6439357	97.4633215
		13,6	31.4749784	97.6447358
		13,7	40.5250216	97.6447358
		13,8	49.3560643	97.4633215
	7,3	14,6	27.2276449	104.5454366
		14,7	36.0000000	104.7101762

2v	4v	8v	ϕ	θ
		7,4	44.7723551	104.5454366
		15,7	31.6954597	110.9612167
		15,8	40.3045403	110.9612167
4,2	8,4	16,8	36.0000000	116.5650512

CLASS I METHOD I ICOSAHEDRAL COORDINATES 141